



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**OPTIMALIZACE VÝROBNÍHO PROCESU PŘESNÉHO  
OBRÁBĚNÉHO DÍLU**

OPTIMIZATION OF THE PRODUCTION PROCESS OF A PRECISION MACHINED PART

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Štěpán Kolomý**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**

**BRNO 2021**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Štěpán Kolomý**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Optimalizace výrobního procesu přesného obráběného dílu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analýza současného stavu výrobního procesu součásti s vysokou náročností na přesnost. Zvážení alternativních výrobních technologií, výběr předpokládaného řešení. Experimentální ověření, rozbor kvality a přesnosti výrobních kusů. Technologicko–ekonomické vyhodnocení, diskuze a závěry pro praxi.

### Cíle diplomové práce:

Rozbor současného stavu výrobního procesu.  
Analýza a návrh možných řešení problému.  
Zavedení dílčích opatření zlepšující efektivitu a kvalitu výrobního procesu.  
Vyhodnocení účinnosti zavedených opatření.  
Možná alternativní řešení.

### Seznam doporučené literatury:

SHAW, M. C. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, 2nd ed., 2005, pp. 651, ISBN 0-1-514206-3.

TLUSTY, J. Manufacturing Process and Equipment. 1st edition. Prentice Hall, 1999. 928 s. ISBN 10-0201498650.

BARÁNEK, I. Rezné materiály pre rýchlostné, tvrdé a suché obrábanie. TU Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 1. vyd., Slovensko, Trenčín. s. 112. ISBN 80-8075-013-0.

SCHRADER, G. F., ELSHENNAWY, A. K., DOYLE, L. E. Manufacturing processes and materials. [vid. 20. 10 2020]. Dostupné na World WideWeb:

[http://books.google.cz/books?id=Nz2wXvmkAF0C&pg=PT214&dq=metal+casting+material+isbn&hl=cs&ei=bnLJTSD1Mlr1sgbtoejqBg&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=3&ved=0CEgQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false](http://books.google.cz/books?id=Nz2wXvmkAF0C&pg=PT214&dq=metal+casting+material+isbn&hl=cs&ei=bnLJTSD1Mlr1sgbtoejqBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CEgQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false)

GUO, Y. B., LI, W., JAWAHIR, I. S. Surface Integrity Characterization and Prediction in Machining of Hardened and Difficult to Machine Alloys: a State-of-Art Research. Review and Analysis Mach. Sci. Technol., 13 (2009), pp. 437–470.

ZAHAF, M. Z., BENGHERSALLAH, M., AMIRAT, A. Contribution in developing a rapid strategy in assessing hardened steel machining. 2020. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 111(1-2), pp. 525-535.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací řezných podmínek při obrábění přesného dílu v hromadné výrobě. V praktické části diplomové práce je porovnán hrubovací nástroj s vyměnitelnými břitovými destičkami s nově implementovanou hrubovací frézou. Je analyzováno vzniklé opotřebení na obou nástrojích. Dále je provedena analýza drsnosti obrobeného povrchu pomocí frézovacího nástroje. Výstupem práce je získání optimálních řezných parametrů za účelem dosažení minimální drsnosti obrobeného povrchu.

### Klíčová slova

optimalizace, řezné podmínky, drsnost povrchu, opotřebení nástroje, analýza.

## ABSTRACT

This master's thesis deals with optimization of cutting conditions when machining of precise parts in mass production. In experimental part of this thesis is a comparison of the roughing tool with indexable cutting inserts with the new implemented milling cutter. Tool wear of both roughing tools has been analysed. The surface roughness analysis after machining with the face milling cutter was performed. The output of this work is to obtain optimal cutting conditions to gain a minimum surface roughness.

### Key words

optimization, cutting conditions, surface roughness, tool wear, analysis

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOLOMÝ, Štěpán. *Optimalizace výrobního procesu přesného obráběného dílu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132862>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Miroslav Píška.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Optimalizace výrobního procesu přesného obráběného dílu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

14.5.2021

Datum

Bc. Štěpán Kolomý

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům výrobního závodu za pomoc a rady při zpracování praktické části diplomové práce.

V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za podporu, a především za trpělivost, kterou se mnou měli při psaní mé diplomové práce.

## OBSAH

ABSTRAKT .....	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE .....	3
PROHLÁŠENÍ.....	4
PODĚKOVÁNÍ .....	5
OBSAH.....	6
ÚVOD.....	8
1 OPTIMALIZACE VÝROBNÍHO PROCESU .....	9
1.2 Úvod do optimalizační problematiky .....	10
1.2 Optimalizační model.....	12
1.3 Popis vybraných druhů optimalizačních metod.....	13
1.3.1 Lineární programování .....	13
1.3.2 Nelineární programování .....	17
1.3.3 Celočíselné programování .....	17
1.3.4 Dynamické programování.....	18
1.3.5 Vícekriteriální programování.....	18
1.4 Formulace vybraných omezujících podmínek pro konvenční optimalizaci .....	19
2 METODY ZLEPŠOVÁNÍ A ŘÍZENÍ KVALITY PROCESU .....	22
2.1 Six sigma.....	22
2.2 Analýza způsobilosti procesu .....	23
2.2.1 Indexy způsobilosti .....	23
2.3 Paretova analýza .....	25
2.4 Metoda zlepšování Kaizen.....	25
2.5 Taguchiho metoda.....	26
3 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY SOUČÁSTI.....	27
3.1 Příprava polotovarů.....	27
3.1.1 Materiál příruby a válce .....	28
3.2 Svařovací proces příruby a válce .....	28
3.2.1 Technologie svaření příruby a válce .....	29
3.3 Hrubování na stroji A .....	30
3.4 Dokončení na stroji B .....	32
3.5 Odmaštění kusů od oleje.....	36
3.6 Ruční odstraňování přebytečných třísek z kusů .....	36
3.7 Rozměrová kontrola kusů na měřicím automatu .....	37
3.8 Praní kusů .....	38

3.9	Vizuální kontrola kvality obrobených kusů .....	38
4	OPTIMALIZACE VÝROBNÍHO PROCESU, ANALÝZA A SBĚR DAT .....	39
4.1	Používaná měřicí zařízení .....	39
4.2	Analýza a sběr dat z výrobního procesu na stroji B .....	40
4.2.1	Analýza nákladů jednotlivých nástrojů používaných na stroji B.....	41
4.2.2	Analýza životnosti jednotlivých nástrojů používaných na stroji B .....	41
4.2.3	Analýza délky taktů jednotlivých nástrojů používaných na stroji B .....	42
4.3	Analýza a sběr dat hrubovacího nástroje T4.....	42
4.3.1	Popis nástroje a používané řezné podmínky .....	43
4.3.2	Výpočty strojních časů a počtu obdržených rázů .....	43
4.3.3	Vyhodnocení vzniklého opotřebení hrubovacího nástroje T4 .....	45
4.3.4	Vyhodnocení efektivity výměn nástroje T4.....	50
4.3.5	Měření geometrie břitu nové VBD .....	51
4.3.6	Vyhodnocení tvaru vzniklých třísek .....	52
4.4	Vyhodnocení a popis hrubovací frézy .....	53
4.4.1	Popis nástroje a používané řezné podmínky .....	53
4.4.2	Výpočty strojních časů a počtu obdržených rázů .....	54
4.4.3	Vyhodnocení vzniklého opotřebení hrubovací frézy .....	55
4.4.4	Vyhodnocení efektivity výměn hrubovací frézy.....	58
4.4.5	Měření geometrie břitu nové frézy .....	59
4.4.6	Vyhodnocení tvaru vzniklých třísek .....	60
4.5	Rozbor kvality a přesnosti výrobních kusů.....	61
4.6	Technologicko-ekonomické vyhodnocení dosažených výsledků.....	62
4.6.1	Vyhodnocení kvality obrobeného povrchu v úseku číslo 6.....	62
4.6.2	Vyhodnocení kvality vyhrubované části kusu .....	64
4.6.3	Nepřímé dopady na výrobu po implementaci hrubovací frézy.....	65
4.6.4	Ekonomické zhodnocení obou nástrojů .....	66
4.7	Optimalizace řezných podmínek .....	66
5	DISKUZE .....	71
5.1	Návrhy na pokračování řešení .....	71
	ZÁVĚR .....	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	74
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	81
	SEZNAM PŘÍLOH.....	85



## ÚVOD

Strojírenská výroba dnes tvoří významnou část světové ekonomiky. Široká konkurence na trhu vede k tomu, že výrobní proces musí být přesný, rychlý, kvalitní a hospodárný. V neposlední řadě je také nutné brát ohled na životní prostředí. Zejména však hospodárnost hraje důležitou roli. Zákazník požaduje, aby měl produkt definované rozměry, kvalitu obrobeneho povrchu a co možná nejnížší cenu.

V hromadné výrobě je velmi důležité správně zvolit technologii výroby, výrobní nástroje, řezné podmínky a mnoho dalšího. Technologie musí být zvolena tak, aby zaručila požadovanou jakost součástí. Výrobní nástroje mají také velmi důležitou roli. Na trhu existuje mnoho výrobců nástrojů, ale ne všechny nástroje jsou vhodné pro danou technologickou operaci. Důležité je vybrat ten nástroj, který bude mít požadovanou životnost, stabilní proces obrábění a přijatelnou cenu při splnění kvalitativních podmínek. Nástroje se liší svojí geometrií a povlakem. Pro každou operaci se hodí jiná geometrie a také jiný povlak. Řezné podmínky velmi ovlivňují obráběcí proces. Jejich volba je v sériové výrobě stěžejní. Všechny výše zmíněné aspekty jsou ovlivněny materiálem obrobku. Výrobní technologie, druh nástroje a řezné podmínky se budou lišit, pokud bude obráběný materiál uhlíková ocel, korozivzdorná ocel, kalená ocel, litina atd.

Správné utváření třísky je také velmi důležité. Nevhodně utvářená tříska může způsobit horší kvalitu obrobeneho povrchu nebo dokonce poškození nástroje. Pokud jsou třísky vhodně utvářeny a odváděny z místa řezu, tak může výrobní stroj vyrábět v delších časových úsecích bez zásahu obsluhy, což vede také k úspoře výrobních nákladů. Právě lepší odvádění třísek z místa řezu bude také předmětem praktické části, ve které bude ukázáno, že změnou výrobní technologie dojde k lepšímu odvodu třísek z místa řezu a tím dojde ke zvýšení celkové produkce a snížení počtu vizuálně neshodných kusů.

Pokud se v sériové výrobě podaří snížit náklady na výrobu součástí, tak to v konečném důsledku znamená velké celkové úspory, což bude ukázáno v ekonomickém zhodnocení této práce. Úspor se dá dosáhnout několika cestami. V první řadě lze snížit náklady na řezné nástroje, což bude předmětem praktické části. Za druhé je možné nastavit řezné podmínky tak, aby bylo vyrobeno více dílů, a tím pádem vyšší spotřeba nástrojů bude vykompenzována vyšším prodejem obrobeneých kusů. Dalším způsobem je snížit počet neshodně vyrobených kusů.

V praktické části této práce bude popsán technologický postup výroby přesného obráběného dílu. Následovat bude analýza, která se bude zabývat výrobním procesem, Tato analýza pomůže nalézt místo vhodné k optimalizaci. Bude následovat porovnání používaného nástroje s nově implementovaným nástrojem, a to z hlediska počtu obdržených rázů, vzniklého opotřebení, tvaru vzniklých třísek a kvality povrchu. Budou provedeny experimenty, ze kterých budou získány optimální řezné podmínky za účelem dosažení minimálních parametrů drsnosti povrchu Ra a Rz. V diskuzi budou nastíněna možná alternativní řešení.

## 1 OPTIMALIZACE VÝROBNÍHO PROCESU

Optimalizace řezných podmínek je důležitou součástí při plánování obráběcího procesu. Správně zvolené řezné podmínky mají vliv na výrobní náklady i kvalitu vyráběných součástí. Avšak podrobná analýza může stát značné množství peněz a je potřeba vzít v úvahu, zda je pro danou aplikaci optimalizace vhodnou volbou [1].

V pracích [2; 3] byla zkoumána optimalizace řezných podmínek při CNC soustružení hliníkové slitiny Al6061. Byl analyzován vliv řezné rychlosti, posuvu a šířky záběru ostří na drsnost povrchu a na množství odebraného materiálu. Optimalizace řezných podmínek při soustružení oceli 316 se věnovali Ramu, Srinivas a Vekatesh [4]. Hanafi, Khamlichi, Cabrera a další [5] zjišťovali optimální řezné parametry při soustružení kompozitu PEEK vyztuženého třiceti procenty uhlíkových vláken. Podmínky byly optimalizovány za účelem nalezení minimální drsnosti povrchu vyjádřené průměrnou aritmetickou odchylkou a spotřeby energie během obrábění. Tyto čtyři články používají pro optimalizaci Taguchiho metodu.

Metoda optimalizace hejnem částic byla použita pro nalezení optimálních řezných parametrů za podmínek dodržení požadované drsnosti povrchu. Experimenty byly provedeny pro čtyři různé materiály vzorků, kterými byly čistý hliník, čistá měď, mosaz a nízkouhlíkovou ocel [6]. Stejný druh optimalizace použili také Marko, Simon, Tomaz, Matej a další [7]. Pomocí tohoto druhu optimalizace byly získány optimální řezné podmínky za účelem minimálních výrobních nákladů. Omezujícími podmínkami byly řezná síla, drsnost obrobeného povrchu a trvanlivost nástroje.

V člancích [8; 9] je použita vícekriteriální optimalizace pro určení optimálních řezných parametrů při soustružení. V úvahu je vzata, jak ekonomická stránka věci, tak vliv na životní prostředí. Omezujícími podmínkami jsou řezný výkon, složky celkové síly a drsnost povrchu. Vícekriteriální optimalizaci použili také Bagaber a Yusoff [10]. Byly optimalizovány řezné parametry za účelem minimalizace spotřeby energie a drsnosti povrchu při soustružení korozivzdorné oceli. Výsledky ukazují, že minimální spotřeba energie je při nejmenší řezné rychlosti, zatímco posuv a šířka záběru ostří jsou největší. Minimální drsnost povrchu je, pokud posuv a šířka záběru ostří jsou na nejnižší hodnotě.

Zhang, Bao a Huang [11] optimalizovali řezné parametry za účelem minimalizace dopadů na životní prostředí. Vlivy, které byly brány v potaz, jsou spotřeba energie, hluchnost a ekonomická stránka věci.

Camposeco-Negrete [12] zjistil optimální řezné podmínky při hrubovacím soustružení hliníkové slitiny. Optimální hodnota řezné rychlosti, posuvu a šířky záběru ostří byla získána za účelem minimalizace spotřebované energie a drsnosti povrchu za podmínek stejně odebraného materiálu. Velchev, Kolev, Ivanov a Gechevski [13] prezentují získání optimálních řezných parametrů při minimalizaci spotřeby energie během soustružení. Byl nalezen vliv druhu obráběcí destičky, posuvu a šířky záběru ostří na minimální spotřebu energie. Menší spotřeba energie je za předpokladu, že bude použita destička s větší odolností proti opotřebení.

Bhushan [14] zkoumal vliv řezných podmínek a velikosti rádiu špičky při soustružení hliníkového kompozitu 7075 s patnácti procenty karbidu křemíku. Tyto řezné parametry a poloměr špičky jsou optimalizovány tak, aby byla minimální spotřeba energie a maximální trvanlivost nástroje. Bhushan [15] analyzoval vliv rádiu špičky a řezných podmínek na výslednou kvalitu povrchu a trvanlivost nástroje. Optimalizace probíhala při

soustružení hliníkového kompozitu 7075 s patnácti procenty karbidu křemíku. Optimální hodnoty řezných podmínek a poloměru špičky byly nalezeny tak, aby splňovaly podmínku minimální drsnosti povrchu a maximální trvanlivosti nástroje.

Zuperl a Cus [16] optimalizovali řezné podmínky tak, aby bylo dosaženo maximálního rozsahu produkce také pro snížení výrobních nákladů a zlepšení celkové kvality obrobeneho dílu. Pro určení optimálních parametrů řezných podmínek byla použita metoda neuronové sítě.

Saravanan, Siva Sankar, Asokan a další [17] získali optimální řezné podmínky během soustružení válcového vzorku. Byly soustruženy čtyři různé druhy vzorků. U všech vzorků se jednalo o plynulý řez. V této studii bylo pro získání optimálních parametrů použito šest různých optimalizačních metod.

Walvekar a Lambert [18] použili pro získání optimální řezné rychlosti a posuvu geometrické programování. Tyto optimální hodnoty jsou podmíněny řadou omezujících podmínek, které vedou k získání minimálních nákladů.

Rao a Kalyankar [19] provedli optimalizaci procesních parametrů, kterými jsou řezná rychlost, posuv, šířka záběru ostří a počet záběrů nástroje při soustružení. Pro nalezení optimálních procesních parametrů je použit optimalizační algoritmus založený na výuce a učení.

Alrashdan, Bataineh a Shbool [20] se zabývali optimalizací řezných podmínek v průběhu čelního frézování oceli D2. Kritéria jsou minimální náklady na výrobu a spotřeba elektrické energie během obrábění. K získání optimálních hodnot řezných parametrů je použita metoda genetických algoritmů. Bylo zjištěno, že minimálních nákladů bude dosaženo při použití minimální šířky záběru ostří.

Jia, Tang, Lv, Zhang a Yuan [21] zkoumali množství energie potřebné k řeznému procesu v závislosti na množství odebraného materiálu jako celku, což má za následek změnu řezných podmínek v každém okamžiku řezného procesu. Experimenty byly prováděny při čelním soustružení za účelem určení optimálního výrobního plánu.

Závěrečné práce [22; 23; 24; 25] se zabývají optimalizací řezných podmínek při výrobě dané součásti. Zejména pak práce [23] používá k optimalizaci řezných podmínek metodu plánovaných experimentů, ze kterých jsou následně vybrány optimální řezné podmínky.

## 1.2 Úvod do optimalizační problematiky

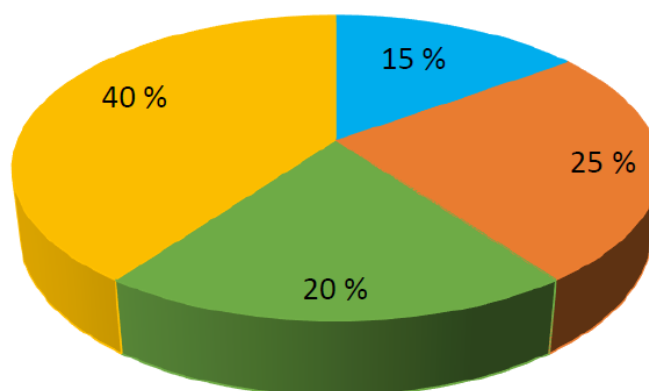
Jak bylo zmíněno v úvodu, strojírenská výroba tvoří velkou část světové ekonomiky. Stále se vyvíjející technologie a konkurence na trhu vytváří tlak na strojírenské podniky, aby jejich produkty měly co nejnižší ceny, což musí vést v konečném důsledku ke snižování výrobních nákladů. Náklady na výrobu tvoří značnou část celkové ceny hotového produktu, což znázorňuje obrázek 1.1 [26].

Technické a technologické výsledky inovací způsobují lepší produktivitu práce, která vede ke snížení výrobních nákladů. Avšak samotné inovace vyžadují velké finanční investice. Další možností, jak se dají snížit výrobní náklady, je optimalizace výrobního procesu, což znamená efektivnější využití současného výrobního zařízení [26].

Potenciální oblastí na možnou optimalizaci je technologie obrábění. Je možné provést optimalizaci řezného nástroje, dále optimalizovat řezné podmínky společně

s trvanlivostí nástroje [26]. V současné době je optimalizace řezných podmínek jednou ze slabších částí technické přípravy výroby. Cílem optimalizace je nalezení optimálních řezných podmínek. Převážně se jedná o řeznou rychlost, posuv a šířku záběru ostří. Dále je snaha optimalizovat životnost nástroje [27]. Optimalizace řezných podmínek je složitý proces, který je podmíněn znalostí technických, ekonomických a fyzikálních vztahů pro danou obráběcí metodu. V případě obrábění je možné tyto vztahy aproximovat vhodnými funkcemi tak, aby odpovídaly skutečnosti. Komplexní optimalizace řezných parametrů je z hlediska matematiky založena na řešení soustav rovnic. Tyto rovnice předepisují vzájemnou závislost řezných podmínek a omezujících kritérií. Pro komplexní optimalizaci je důležitá znalost celé řady aspektů, které mají vliv na výrobní proces. Mezi aspekty lze zařadit údaje o obráběcím stroji nebo materiálu nástroje či obrobku. Komplexní optimalizace je velmi náročná, proto se častěji používá optimalizace částečná. Částečná optimalizace nevyžaduje takové množství údajů potřebných k určení optimálních řezných parametrů za daných omezujících podmínek [28].

■ Náklady na technickou přípravu výroby ■ Administrativní a marketingové náklady  
■ Zisk ■ Výrobní náklady



Obr. 1.1 Výrobní náklady v ceně strojírenských produktů – podle [26].

Uvedené příklady, které se dají řešit pomocí vhodné optimalizační metody jsou následující [29]:

- navržení optimálních řezných podmínek, tj. řeznou rychlost, posuv a šířku záběru ostří pro danou technologickou operaci,
- investice daného peněžního obnosu do podnikové výroby tak, aby bylo malé riziko a velký výnos,
- navrhnutí optimálního rozvržení časového plánu,
- stavba výrobní linky s předepsanou nosností při minimální celkové spotřebě materiálu,
- rozmístění určitého počtu strojů ve strojírenském podniku tak, aby byla dodržena proudová výroba,
- regulace oběhu vody a přívodu plynu do kotle tak, aby ve strojírenském podniku byla požadovaná teplota.

## 1.2 Optimalizační model

Optimalizace je matematická disciplína, která se zabývá hledáním extrémů funkce mnoha proměnných za daných omezujících podmínek [29]. Optimalizační úloha je taková úloha, která se snaží nalézt minimum nebo naopak maximum dané funkce [30]. Tato funkce se nazývá účelová, kriteriální, optimalizační nebo cílová [31].

### Řešení (rozhodnutí)

V optimalizačním modelu je řešení určeno vektorem proměnných (viz vztah 1.1). Každá proměnná formuluje rozsah jednoho procesu, prvku řešení či aktivity rozhodnutí. Přijatelná řešení jsou ohraničena řadou omezujících podmínek, které vymezují množinu přípustných řešení. Omezující podmínky je možné vyjádřit vhodnými funkcemi, a to buď explicitními, nebo implicitními rovnicemi či nerovnicemi. Příklad obecné omezující podmínky je dán vztahem 1.2 [32].

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n \quad (1.1)$$

$$q(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (1.2)$$

kde  $q(\mathbf{x})$  je reálná funkce proměnných  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

### Omezující podmínky a množina přípustných řešení

Body, které vyhovují množině omezujících podmínek, se nazývají množinou přípustných řešení (viz vztah (1.3)). Za přípustné řešení je považován každý prvek, který leží v množině  $M$ . Naopak za nepřípustné řešení jsou považovány ty prvky, které nevyhovují alespoň jedné omezující podmínce, a tudíž neleží v množině  $M$ . Výběr výsledku sledovaného problému se odvíjí od sledovaných cílů, respektive omezujících podmínek [32].

$$M = \{\mathbf{x} \in R^n \mid q_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, m\} \quad (1.3)$$

### Účelová (kriteriální) funkce

Obecná kriteriální funkce, na které hledáme minimum či maximum, může vypadat tak, jak znázorňuje vztah 1.4. Kde  $M$  je množina přípustných řešení a  $\mathbf{x}$  je vektor proměnných [31].

$$\text{funkce } \min_{\mathbf{x} \in M} f(\mathbf{x}) ; \text{ funkce } \max_{\mathbf{x} \in M} f(\mathbf{x}) \quad (1.4)$$

### Optimální řešení a optimalizační model

Úloha, která má za cíl nalézt minimální hodnoty optimalizační funkce za předepsaných kritérií, se nazývá minimalizační optimalizační model (viz vztah 1.5). Optimální řešení  $\mathbf{x}_{opt}$  je takové řešení, ve kterém má účelová funkce minimální hodnotu a zároveň splňuje všechna kritéria [32].

$$\min \{f(\mathbf{x}) \mid q_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, \dots, m, \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n \}, \quad (1.5)$$

kde  $f(\mathbf{x})$  a  $q_i(\mathbf{x})$  jsou reálnými funkcemi více proměnných a  $\mathbf{x}$  je prvkem vektorového prostoru  $R^n$ .

Je nutné poznamenat, že ekonomické optimum se může lišit od matematického optima, protože matematická formulace problému s sebou nese omezení optimalizačního modelu a postupu řešení. Extrémní řešení může být nestabilní, protože obecně předpokládá například extrémní náklady nebo čerpání zdrojů atd. Proto je někdy za řešení považováno řešení suboptimální  $x_{sub}$ , to znamená, že řešení je „velmi dobré“ z hlediska omezujících podmínek a kriteriální funkce v něm dosahuje „velmi dobré“ hodnoty, avšak toto řešení není minimum ani maximum [32].

### Suboptimální řešení

Možné řešení optimalizačního modelu se nazývá suboptimální řešení (viz vztah 1.6), pro které platí [32]:

$$|f(x_{opt}) - f(x_{sub})| \leq D_D, \quad (1.6)$$

kde  $D_D$  je přijatelná odchylka od optimální hodnoty optimalizační funkce.

### 1.3 Popis vybraných druhů optimalizačních metod

Optimalizační metody jsou soubory obecných modelů, které slouží k určení optimálního řešení daného problému a modelovaných reálných skutečností. Získaná řešení mohou být prvky konečné nebo nekonečné množiny. Pro výběr vhodné metody řešení je potřeba nejdříve daný problém analyzovat z mnoha hledisek, které jsou například výběr vhodných funkcí, omezení a rozhodovacích proměnných [33].

Rozdělení optimalizace (programování) podle množiny přípustných řešení a druhu kriteriální funkce [31]:

- lineární programování,
- nelineární programování – konvexní a kvadratické,
- celočíselné programování,
- dynamické programování,
- vícekriteriální programování.

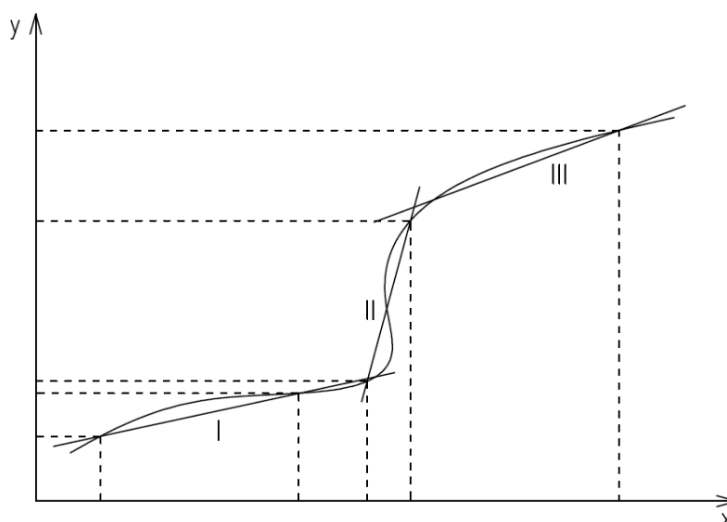
#### 1.3.1 Lineární programování

Lineární programování je uplatněnou matematickou disciplínou, která vznikla z důvodu její potřeby převážně v ekonomické sféře. Lineární optimalizace nachází své využití při řízení národního hospodářství a vědeckých podniků [34]. Kladných výsledků, kterých bylo dosaženo pomocí lineárního programování je možné vysvětlit dvěma důvody. Prvním z nich je fakt, že značná část ekonomických problémů může být popsána pomocí lineárních modelů, ve kterých se využívá lineárních rovnic, nerovnic a funkcí. Druhým důvodem je to, že lineární programování je poměrně snadná metoda, která využívá k nalezení řešení jednoduchých a mechanizovatelných metod [35].

Lineární programování (LP) se zajímá o problémy, které souvisí s hledáním vázaných extrémů funkcí s více proměnnými, které mají lineární charakter. Omezující podmínky jsou taktéž lineární rovnice nebo nerovnice. LP může být v literatuře uvedeno také pod názvem matematické či optimální programování. Pomocí těchto úloh je možné řešit problémy, kde optimální varianta je zvolena na základě určeného cílu a z něj odvozených kritérií [36].

Linearita je tedy základním předpokladem k řešení problému, protože využívá lineární funkce, které představují poměrně jednoduchý matematický aparát. Kvůli tomuto zjednodušení dochází k rozporu mezi realitou a požadavky na linearitu, jelikož většina procesů v praxi nevykazuje lineární charakter. Problém se tím však stává dostupnějším širšímu okruhu uživatelů. Zároveň tato skutečnost umožňuje použití univerzální metody, kterou je simplexová metoda [37]. Popis simplexové metody bude vysvětlen níže.

Je jasné, že produkční funkce je lineární pouze v dílčích úsecích. Proto je důležité stanovit určité meze, ve kterých jsou výrobní faktory konstantní a skutečně zastupitelné. Problémy s nelineárním charakterem je možné modelovat tak, že nelineární funkce bude aproximována po částech lineárními funkcemi (úsečkami), jak je zobrazeno na obrázku 1.2. Lineární vztah, kterým je nahrazena část nelineární funkce platí pouze pro dílčí úsek. V důsledku to znamená to, že každý dílčí úsek je formulován jako samostatný proces [37].



Obr. 1.2 Lineární aproximace nelineární funkce – podle [37].

Metoda LP je k dispozici, když je zapotřebí nalézt optimální rovnovážný stav mezi potřebami a dostupnými zdroji v situacích když [36]:

- jsou omezené zdroje pro řešení problému ekonomického charakteru,
- jsou využity zdroje při ekonomické činnosti,
- pro řešení problému je možné vybrat jednu ze dvou nebo více variant,
- je známý cíl, podle kterého je možné posuzovat vhodná řešení a následně vybrat optimální variantu.

### Formulace problému

Základní problém lineárního programování popisuje vztah 1.7 [38].

$$\min \{c^T x; Ax = b, x \geq 0\}, \quad (1.7)$$

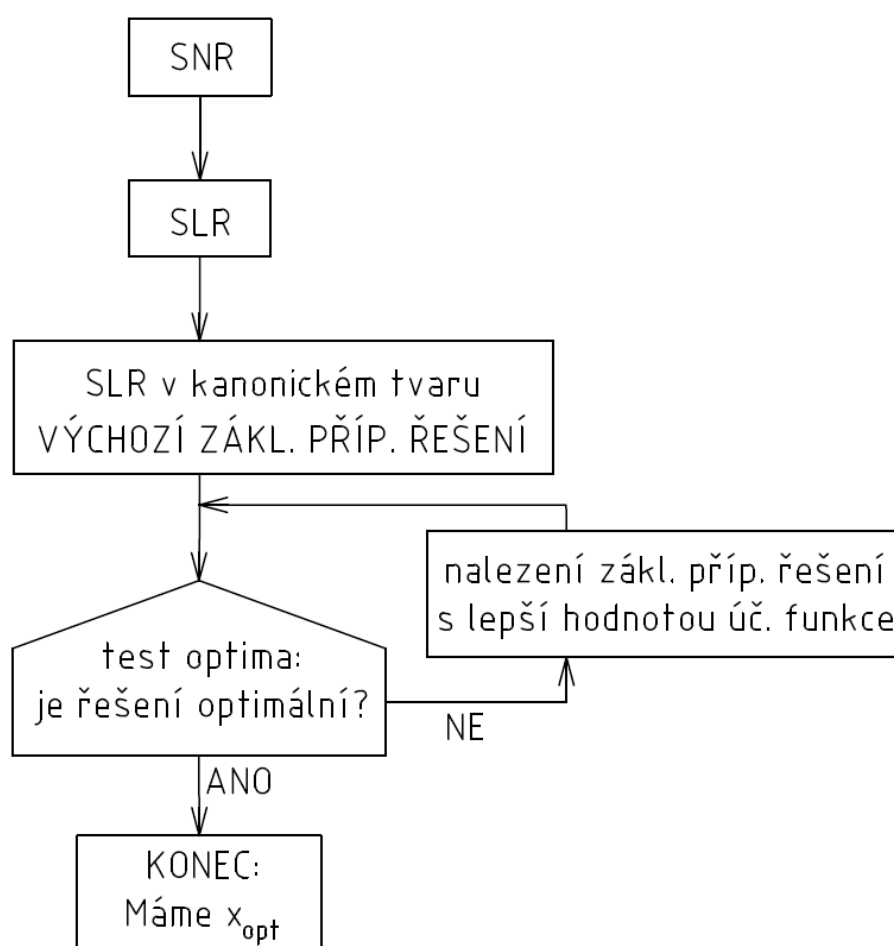
kde vektor  $x$  se nazývá přípustným řešením úlohy 1.7 za předpokladu  $Ax = b, x \geq 0$ .

Jde tedy o nalezení bodu, ve kterém lineární účelová funkce  $c^T x = \sum_{j=1}^n c_j x_j$  dosahuje svému minima na množině kladných řešení soustavy  $Ax = b$ . [38].

Úlohy maximalizační s omezujícími podmínkami ve tvaru  $Ax \leq b$  resp.  $Ax \geq b$ , bez požadavku kladnosti vektoru  $x$  nebo s požadavkem kladnosti jenom některých jeho složek, je možné převést na základní úlohu, která je formulována vztahem 1.7 [38].

### Simplexová metoda

Jedním z možných algoritmů, jak řešit problém lineární optimalizace (LO), je simplexová metoda (simplexový algoritmus). Simplexová metoda je univerzální algoritmus, který je velmi často používán při řešení problému LO. Tato metoda používá k nalezení optimálního řešení iterační způsob. Metoda postupuje od základního řešení a postupným zvyšováním nebo snižováním hodnoty kritériální funkce se po jednotlivých krocích přibližuje optimálnímu řešení. Pokud je dosaženo řešení, které už nemůže mít vyšší nebo nižší hodnotu účelové funkce, tak algoritmus končí, je dosaženo optimální hodnoty [39; 40]. Popsaný algoritmus řešení úloh pomocí simplexové metody je na obrázku 1.3.



Obr. 1.3 Algoritmus klasické simplexové metody – podle [41].

Nechť je problém lineární optimalizace zadán pomocí účelové funkce a omezujících podmínek ve tvaru nerovnic. V prvním kroku dojde k odstranění nerovností, což vede ke vzniku bázevých proměnných. Omezující podmínky a účelová funkce jsou zapsány do takzvané simplexové tabulky (viz obr. 1.4). Následně se provádí algoritmus, pomocí kterého bude dosaženo optimální hodnoty [39]. V knize [42] je popsán princip simplexového algoritmu v jednotlivých krocích.



1	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$\dots$	$c_n$	$-b_0$
0	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	$\dots$	$a_{1n}$	$b_1$
0	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	$\dots$	$a_{2n}$	$b_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\vdots$
0	$a_{m1}$	$a_{m2}$	$a_{m3}$	$\dots$	$a_{mn}$	$b_m$

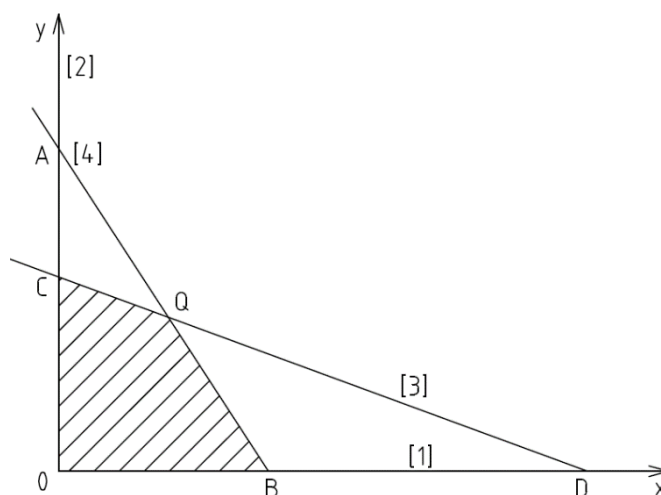
Obr. 1.4 Obecný zápis simplexové tabulky – podle [43].

### Grafická metoda

Další možnou metodou řešení LO je grafická metoda. Mezi výhody této metody patří její názornost, naopak mezi nevýhody lze zařadit to, že je vhodná pouze pro úlohy o dvou nebo třech neznámých. Nechť je dán matematický model obecné úlohy LP, který má dvě proměnné  $x_1, x_2$ . Analytické vyjádření rovnice nebo nerovnice pomocí proměnných  $x_1, x_2$  představuje polorovinu, případně přímku v  $E_2$ . Průnikem konečného množství omezujících podmínek vznikne společné řešení. Pokud je průnik jednotlivých omezujících podmínek neprázdný, pak se tato množina nazývá konvexní polyedrická množina. Kriteriační funkce je v lineárním tvaru (viz vztah 1.8.) [34].

$$z = c_1x_1 + c_2x_2, \quad (1.8)$$

kde parametr  $z$  určuje úsek, který tato přímka vytíná na ose  $y$ . Pokud je přímka (viz vztah 1.8) posouvána v rovnoběžné poloze tak, aby průnik této přímky a polyedrické roviny byl neprázdný. Toto vede k zisku optimálního řešení úlohy. Pro zisk maximální hodnoty se posouvá přímka do pravého horního rohu konvexního polyedru. Naopak pro zisk minimální hodnoty se posouvá do levého dolního. Je zřejmé, že optimum se bude nacházet v jednom z vrcholů konvexního polyedru, který je vytyčen omezujícími podmínkami. Tímto způsobem lze řešit problémy LO pro dvě nebo tři neznámé [34]. Obrázek 1.5 znázorňuje ukázkou grafického řešení, kde bod  $Q$  je optimálním řešením, protože v něm účelová funkce dosahuje svého maxima [42]. Číslice 1–4 znázorňují omezující podmínky.



Obr. 1.5 Ukázkou grafického řešení – podle [42].

### 1.3.2 Nelineární programování

Pokud úloha nesplňuje podmínky linearity účelové funkce a omezujících podmínek, tak se jedná o nelineární programování [44]. I když se v praxi objevují nelineární úlohy velmi často, mají modely nelineárního programování omezené použití. Složitost řešení je v případě nelineárního modelu značně vyšší než v případě lineárního. Avšak některé nelineární modely se dají dobře aproximovat jinými lineárními výrazy. Je si však důležité uvědomit, že každý model je zjednodušením reality [45].

Úlohy, kde se vyskytují aplikace nelineárního programování, mohou být například optimalizace portfolia a finanční analýzy, optimálního využití zařízení a materiálu, optimálního rozvrhování a ve strojírenském programování atd [45].

Obecná formulace úlohy nelineárního programování může vypadat tak, jak popisuje vztah 1.5 akorát s tím rozdílem, že má omezující podmínky i účelovou v nelineárním tvaru [44]. Metody řešení jsou většinou iterační a konvergují jen k lokálnímu minimu [31].

### Konvexní a kvadratická optimalizace

Oba tyto druhy patří do nelineárních úloh. U konvexní optimalizace je množina přípustných řešení  $M$  ohraničena konvexními křivkami [31]. Úlohy kvadratického programování jsou takové, které mají kritériální funkci v kvadratickém tvaru, zatímco omezující podmínky mají lineární charakter. Typickou ukázkou je metoda nejmenších čtverců, která umožňuje vybrat z přípustné množiny takové parametry, které způsobí, že součet čtverců bude minimální. Dále lze mezi kvadratické programování zařadit různé rozhodovací problémy, které jako kritérium používají váhové funkce v kvadratickém tvaru. Některé statistické zkoušky pracují na principu kvadratické optimalizace. Obecně lze úlohy nelineárního charakteru chápat jako složené z jednotlivých řešení kvadratických podúloh [46]. Úloha kvadratického programování má tvar, jak udává vztah (1.9) na konvexní polyedrické množině  $M = \{x \in R^n; Ax = b, x \geq 0\}$  [47].

$$f(x) = p^T x + \frac{1}{2} x^T C x \quad (1.9)$$

Za předpokladu, že  $C$  je pozitivně semidefinitní maticí a množina  $M$  je neprázdná. Z toho vyplývá, že kritériální funkce má konvexní průběh, omezení ve formě nerovností jsou v lineárním tvaru a proměnné jsou kladné [47].

### 1.3.3 Celočíselné programování

Pokud je požadavek na to, aby proměnné byly pouze kladná celá čísla, tak se jedná o úlohy celočíselného programování. Požadavek na celočíselnost vychází většinou z formulace daného problému. Pokud jsou proměnné například počty kusů nebo počet opakování nějakého cyklu, tak je zřejmé, že hodnoty daných proměnných musí být celá čísla. Zde jsou uvedeny příklady úloh s podmínkou celočíselnosti proměnných [48]:

- úloha plánování výroby s polotovary (proměnné představují počet kusů jednotlivých výrobků),
- rozvržení výroby na více období (proměnné jsou ve formě počtu kusů nádrží),
- kontejnerový dopravní problém, kde jsou proměnné ve formě počtu kontejnerů potřebných pro přepravu strojních sestav.

Z výše zmíněných příkladů je jasné, že všechny tyto proměnné musejí být kladná celá čísla. Požadavek na proměnné může být také takový, aby proměnné nabývaly pouze hodnot nul a jedniček. V tomto případě se jedná o úlohy, kde se definuje, zda daný jev nastane (hodnota 1) nebo nenastane (hodnota 0). Takovéto úlohy jsou nazývány úlohami bivalentního programování [48].

Úlohy celočíselného charakteru lze členit z různých hledisek. Jedna možnost klasifikace je na bivalentní úlohy a na úlohy, ve kterých je požadavek na celočíselnost proměnných. Další způsob klasifikace je smíšené celočíselné programování. V tomto případě jsou přípustná řešení jak celočíselná, tak neceločíselná [48].

Úloha celočíselného programování může být formulována například takto [49]:

$$\max f(x) \text{ za podm. } q_j(x) \leq 0, \forall j = 1, \dots, m, \forall i = 1, \dots, n, \text{ kde } x_i \in Z \quad (1.10)$$

V praxi se velmi často vyskytuje požadavek na celočíselnost, avšak řešení je většinou náročné na výpočet. Pro řešení základních úloh celočíselného programování existují určité algoritmy, ale pro složité úlohy může být nalezení řešení prakticky nerealizovatelné. Pro řešení nelze standartně použít simplexovou metodu, protože ta dává řešení obecně neceločíselná. Z tohoto důvodu byly nastíněny speciální algoritmy. Dle charakteru je možné je rozdělit do několika skupin [48]:

- metody řezných (sečných) nadrovin, které jsou vhodné pro řešení smíšených celočíselných úloh LP,
- kombinatorické metody jsou vhodné pro řešení většiny typů celočíselného programování,
- speciální metody se používají pro řešení speciálních úloh celočíselného programování.

### 1.3.4 Dynamické programování

Dynamické programování se zakládá na myšlence postupného snižování rozměru dané úlohy. Způsob, jakým je to provedeno je ten, že hodnota v bodě maxima je uvažována jako funkce  $F(n, \mathbf{b})$ , kde  $n$  je počet proměnných v dané úloze a  $\mathbf{b}$  jsou hodnoty pravých stran omezujících podmínek. Pro funkci  $F(n, \mathbf{b})$  je sestavena funkcionální rovnice, jejímž vyřešením a následným dosazením hodnot za  $n$  a  $\mathbf{b}$  je získána hodnota funkce v bodě maxima a hodnot bodu maxima [50].

Aby byla úloha řešitelná pomocí metody dynamického programování, tak musí vykazovat jistou separovatelnost. Navíc je nutnou podmínkou, aby omezujících podmínek bylo co nejméně, nejlépe jedna. Jinak je zapotřebí použít různých obrátů, které však snižují efektivitu výpočtu [50].

Díky této metodě dynamického programování je poměrně snadné řešit úlohy, kde je požadavek na celočíselnost řešení. Je to mnohdy méně náročné než u těžších úloh s podmínkou neceločíselnosti. Tento jev se však u jiných metod nevyskytuje [50].

### 1.3.5 Vícekriteriální programování

Vícekriteriální programování nebo též rozhodování je disciplína, která se zabývá rozhodovacími situacemi, kde je nutné rozhodnout, která z možných rozhodovacích variant je vhodná. Rozhodnuto má být ne však podle jednoho, ale podle několika kritérií, kde daná

kritéria jsou většinou protichůdná [48; 51]. Vícekriteriální rozhodovací problémy obsahují množinu variant, množinu hodnotících kritérií, které jsou navzájem protkány různými vazbami. Tyto vazby umožní definovat hodnotící funkce a metodu výběru, což vede k následné formulaci vícekriteriálního matematického modelu [51].

Úlohy vícekriteriálního programování mohou být rozděleny podle charakteru množiny rozhodovacích variant takto [51]:

- **vícekriteriální hodnocení variant**, kdy je dán konečných seznam, který definuje množinu přípustných variant,
- **vícekriteriální programování**, kde je množina přípustných variant ohraničena konečným seznamem podmínek, které musí být dodrženy, aby řešení bylo přípustné.

#### 1.4 Formulace vybraných omezujících podmínek pro konvenční optimalizaci

Za konvenční optimalizaci lze považovat to, když je většina omezujících podmínek zanedbána a koncentrace je pouze na základní parametry. V případě obrábění se jedná převážně o řeznou rychlost, respektive otáčky a posuv [31].

Na obráběcí proces může být pohlíženo podle různých kritérií. Mezi základní kritéria optimálnosti lze považovat kritérium maximální výrobnosti a minimálních výrobních nákladů. Většinou se používá kritérium minimálních výrobních nákladů a jen málokdy se používá kritérium maximální výrobnosti. Další druhy kritérií jsou například kritérium maximálního zisku nebo maximálního úběru [52].

Kritérium minimálních výrobních nákladů je možné formulovat vztahem 1.11 a kritérium maximální výrobnosti vztahem 1.12. Oba tyto vztahy je možné dále upravit tak, aby byly vyjádřeny v závislosti na parametrech, které se mají optimalizovat. Ve většině případů jsou vztahy vyjádřeny v závislosti na řezné rychlosti a posuvu, zatímco ostatní parametry jsou považovány za konstantní. Zde jsou uvedeny vztahy 1.11 a 1.12 [52]:

$$VN_u = N_{su} + N_{vn} [Kč] \quad (1.11)$$

$$t_u = t_{As} + t_{vn} \cdot z_v [min], \quad (1.12)$$

kde jednotlivé proměnné jsou:

- $VN_u$  – výrobní náklady na daný operační úsek,
- $N_{su}$  – náklady na strojní a vedlejší práci,
- $N_{vn}$  – náklady na výměnu a znovu seřízení nástroje,
- $t_u$  – čas operačního úseku,
- $t_{As}$  – strojní čas,
- $t_{vn}$  – čas na výměnu a znovu seřízení nástroje,
- $z_v$  – počet výměn nástroje.

Z důvodu realizovatelnosti není v praxi zcela možné použít maximální řezné podmínky. Během obráběcího procesu je nutné dodržet značné množství omezujících podmínek, které jsou například [28]:

- omezením dané výkonem elektromotoru,
- řezným nástrojem – jeho řezivost,
- obráběcím strojem – rozsah otáček pracovního vřetena,
- rozsahem použitelných posuvů,
- kvalitativními požadavky – přesnost rozměru, tvaru a drsnost povrchu,
- tuhostí nástroje,
- obrobiteľností obrobku.

Základem pro určení vhodných řezných podmínek pro danou technologii obrábění je matematické vyjádření omezujících podmínek v závislosti na řezných podmínkách. Tyto vztahy se ve většině případů určují experimentálně. Lze je však použít jen v rozsahu podmínek provedených pokusů. Rozsah použití je možné zvýšit pomocí interpolace [28]. Omezující podmínky se mohou lišit podle druhu technologie. Je nutné vzít v úvahu, které omezující podmínky budou požadovány a jaký bude jejich počet. Čím více omezení bude daná úloha mít, tím složitější bude nalezení výsledného řešení [52].

### Omezení dané výkonem stroje

Tato podmínka je velmi důležitá, pokud se jedná o hrubovací operaci. Vztah 1.13 vyjadřuje výpočet řezného výkon. Po dosazení za řeznou sílu a rychlost  $z$  [53] a vyjádření otáček v závislosti na posuvu vznikne konečný vztah 1.14 pro omezující podmínku. V tomto vztahu se vyskytuje mnoho dalších parametrů, ty jsou však během obráběcího procesu konstantní [31].

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4} [kW] \quad (1.13)$$

$$n \leq \frac{P_c \cdot 6 \cdot 10^7}{C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot \pi \cdot D} \cdot f^{-y_{Fc}} [min^{-1}] \quad (1.14)$$

### Omezení dané řezivostí nástroje

Tato podmínka obsahuje trvanlivost břitu řezného nástroje, která má významný vliv na optimalizaci řezných parametrů [54]. Vztah 1.15 vyjadřuje řezivost nástroje pomocí komplexního Taylorova vztahu. Po dosazení za řeznou rychlost  $z$  [53] a vyjádření otáček v závislosti na posuvu vznikne konečný vztah 1.16 omezující podmínky. Zbylé parametry, které se vyskytují v omezující podmínce jsou konstantní, avšak jejich hodnota je závislá na mnoha faktorech [31].

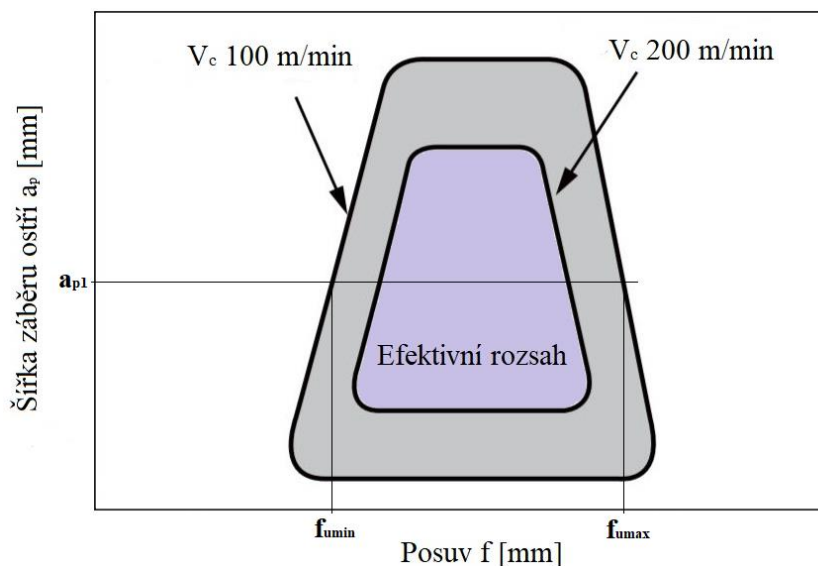
$$v_c = \frac{c_v}{a_p^{x_{vc}} \cdot T^{\frac{1}{m}}} \cdot f^{-y_{vc}} [m/min] \quad (1.15)$$

$$n \leq \frac{c_v \cdot 1000}{a_p^{x_{vc}} \cdot T^{\frac{1}{m}} \cdot \pi \cdot D} \cdot f^{-y_{vc}} [min^{-1}], \quad (1.16)$$

kde  $c_v, x_{vc}, y_{vc}, m$  jsou empirickými konstantami.

### Omezení určené vhodným utvářením třísky

V obráběcím procesu, kde technologické operace nezajišťují samovolné dělení třísky, je potřeba nastavit řezné podmínky tak, aby docházelo k vhodnému utváření třísky pomocí geometrie řezného nástroje. Dlouhé třísky, respektive nevhodně utvářené mohou způsobit zastavení nebo v horším případě havárii stroje. Pomocí experimentů jsou pro danou technologickou operaci a určitý nástroj zjišťovány vhodné řezné podmínky z hlediska utváření třísky [54]. Vhodný rozsah řezných podmínek, tj. posuvu a šířky záběru ostří zobrazuje obrázek 1.6 [55].



Obr. 1.6 Oblast efektivního rozsahu utváření třísky – podle [55].

Omezující podmínky dané vhodnou tvorbou třísky ukazují vztahy 1.17 a 1.18 [54].

$$f \leq f_{umax}[mm] \quad (1.17)$$

$$f \geq f_{umin}[mm] \quad (1.18)$$

### Omezení dané maximálními a minimálními otáčkami z hlediska stroje

Toto omezení bere v úvahu to, že během obrábění musí být otáčky menší, než je limit motoru, a naopak musí být větší, než je daný limit, aby docházelo vůbec k obrábění materiálu. Omezující podmínky jsou formulovány vztahy 1.19 a 1.20 [54].

$$n \leq n_{smax}[min^{-1}] \quad (1.19)$$

$$n \geq n_{smin}[min^{-1}] \quad (1.20)$$

### Omezení dané maximálním a minimálním posuvem z hlediska stroje

Toto omezení bere v potaz to, že během obrábění musí být posuv nástroje menší, než je určitý limit, a naopak musí být větší, než je daný limit, aby docházelo vůbec k obrábění materiálu. Omezující podmínky jsou formulovány vztahy 1.21 a 1.22 [54].

$$f \leq f_{smax}[mm] \quad (1.21)$$

$$f \geq f_{smin}[mm] \quad (1.22)$$

## 2 METODY ZLEPŠOVÁNÍ A ŘÍZENÍ KVALITY PROCESU

### 2.1 Six sigma

Tento přístup řešení kvality výrobního procesu byl vyvinut v 80. letech ve společnosti Motorola. Snahou metody six sigma je minimalizovat výskyt neshod, což přispívá ke zvýšení ziskovosti a produktivity podniku. Slovem neshoda je myšleno cokoli, co je z pohledu zákazníka nepřijatelné. Prevence k zamezení výroby neshodných dílů se dosahuje přístupem, který [56]:

- je systematický,
- zapojuje podnikové vedení,
- je podložený řadou faktů,
- využívá podporu statistických nástrojů,
- je založen na účasti expertů, kteří jsou specialisté na zlepšování procesů a ovládají nástroje pro zlepšení.

Six sigma je pojetí řízení zlepšující efektivitu a hodnotu firmy stálým vylepšováním stávajících procesů ve firmě. Jedná se o manažerskou filozofii, která je založena na zlepšování výrobního procesu na základě získaných dat. Cílem je dosažení takové výroby, aby pouze 3,4 produktů z jednoho milionu byly neshodné z hlediska požadavků zákazníka. Pokud je dosaženo právě této hranice 3,4 produktů, tak to znamená, že je dosažena úroveň šesti sigma mezi dolní a horní úchylkou v Gaussově rozdělení kvality produktů [57]. Pokud je požadována způsobilost procesu tak je nutné dodržet tyto požadavky [56]:

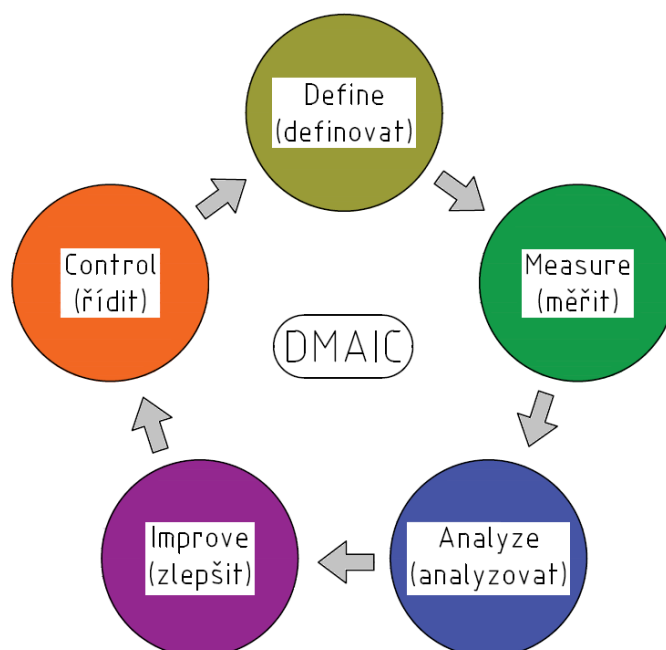
- směrodatná odchylka musí být menší než jedna dvanáctina šířky tolerančního pole a zároveň,
- střední hodnota se nesmí nacházet dále než jeden a půl násobek směrodatné odchylky od středu tolerančního pole.

Díky metodě six sigma lze statisticky posuzovat, jak je na tom aktuální výrobní proces z hlediska kvality produktů. Pokud se podaří snížit variabilitu procesu, tak to vede ke zvýšení jeho výkonu a efektivitu [57]. Redukce variability je v konceptu six sigma dosaženo realizací tak zvaných projektů six sigma. Pro realizaci projektů se používá metodika, která je složená z pěti kroků, které na sebe vzájemně navazují [58]. Tato metodika vede právě ke zdokonalení výrobního procesu. Tato posloupnost jednotlivých kroků bývá v literatuře označena názvem DMAIC [59].

Cyklus zlepšování DMAIC (viz obr. 2.1) je metodologie, která se používá k řešení problémů a má velké uplatnění v podnikání. Písmena představují akronymum pro pět fází zlepšování. Jednotlivé fáze jsou: *Define* (definovat)-*Measure* (měřit)-*Analyze* (analyzovat)-*Improve* (zlepšit)-*Control* (řídit). Obsahy jednotlivých fází jsou následující [60; 61]:

- **Define (definovat)** – tato fáze se zaměřuje na prodiskutování návrhu projektu, sběru dat, analýzu současných dat, načrtnutí procesní mapy, definování plánu a pokynů pro tým,
- **Measure (měřit)** – tato fáze zahrnuje hodnocení současného systému měření, pozorování procesu, sběr dat, detailnější mapování výrobního procesu,

- **Analyze (analyzovat)** – tato fáze se zaměřuje na hledání nenáhodných seskupení v datech, místa, kde jsou časové ztráty, nalezení skutečných příčin, nalezení cesty, která vede ke zrychlení procesu,
- **Improve (zlepšit)** – v této fázi se hledají vhodná řešení problému, přezkoumávají se současné praktiky (zejména ty, o kterých je známo, že mohou přinášet zlepšení), zpracovávají se vhodná kritéria pro daná řešení, zavádí se pilotní projekty pro vybraná řešení, plánuje se implementace nápravných zařízení,
- **Control (řídit)** – v této fázi se provádí dokumentace zlepšených postupů, školení, stanovení postupů pro pozorování důležitých znaků, předání řízení vlastníkovému procesu, uzavírka dokumentace projektu.



Obr. 2.1 Cyklus zlepšování DMAIC – podle [62].

## 2.2 Analýza způsobilosti procesu

Pokud se proces nachází ve statisticky zvládnutém stavu, tak se často v automobilovém průmyslu určuje způsobilost procesu. Dosažené výsledky jsou dále aplikovány při předvídání výkonu procesu. Predikce založená na datech získaných z nestabilního či neopakovatelného procesu v čase by neměla žádný smysl [63; 64].

Pro popsání procesu je zapotřebí více než jednoho ukazatele. Proto byly zavedeny různé druhy ukazatelů. Například ukazatele  $C_p$  a  $C_{pk}$  (viz kapitola 2.2.1) je vhodné aplikovat zároveň společně s grafickým znázorněním. Závěry vyvozené ze získaných ukazatelů by se měly opírat o data, ze kterých byly vypočítány [63].

### 2.2.1 Indexy způsobilosti

#### Index $C_p$

Jedná se o ukazatel způsobilosti procesu porovnávající způsobilost procesu s maximálním eventuálním kolísáním procesu, který je zadáný pomocí tolerančního pole. Tímto ukazatelem je vyjádřena míra variability procesu, zatímco poloha procesu není tímto



ukazatelem ovlivněna. Tento parametr je možné vyčíslit pouze v případě, že jsou předepsány obě mezní hodnoty tolerance [65]. Tento index lze vyjádřit následujícím vztahem [66]:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma}. \quad (2.1)$$

Principem tohoto indexu je porovnání délky tolerančního intervalu (LSL; USL) s délkou  $6\sigma$ . To znamená, že porovnání je mezi délkou intervalu, kde se mají nacházet všechny hodnoty s délkou intervalu, kde se nachází všechny hodnoty. Získané hodnoty indexu  $C_p$  se interpretují následovně [66]:

- pokud je hodnota  $C_p < 1$ , tak není dosaženo předepsané přesnosti, lze tedy stanovit, že daný proces je podle tohoto hlediska nezpůsobilý,
- pokud je hodnota  $C_p = 1$ , tak je dosažená přesnost rovna předepsané, lze tedy definovat proces jako způsobilý, avšak i malá změna směrodatné odchylky může vést k tomu, že se proces stane nezpůsobilým,
- pokud je hodnota  $C_p > 1$ , tak je dosaženo předepsané přesnosti, daný proces je podle tohoto hlediska způsobilý.

Poslední ze zmíněných výsledků je příznivý i z toho pohledu, že existuje rezerva mezi požadovaným a skutečným rozmezím kolísání. Tato rezerva je v praxi požadována v rozsahu dvou směrodatných odchylek. Podíl je v tomto případě  $8\sigma$  ku  $6\sigma$  což vede k hodnotě 1,33. Toto je hranice indexu způsobilosti, od kterého je možné považovat proces za způsobilý [64].

### Index $C_{pk}$

Toto je také ukazatel způsobilosti procesu, který charakterizuje polohu procesu. Pokud jsou na výkrese předepsány dvě mezní hodnoty tolerance je parametr  $C_{pk}$  maximálně roven parametru  $C_p$ , tedy platí nerovnost, že  $C_p \geq C_{pk}$ . Rovnost nastává, pokud je proces centrován. Tyto ukazatelé by se měli analyzovat a vyhodnocovat vždy zároveň. Pokud platí  $C_p \geq C_{pk}$ , lze konstatovat, že existuje příležitost ke zlepšení centrování procesu [65]. Ukazatel způsobilosti  $C_{pk}$  je definován následovně [66]:

$$C_{pk} = \min\{C_{pU}; C_{pL}\}, \text{ kde } C_{pU} = \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma} \text{ a } C_{pL} = \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}. \quad (2.2)$$

Principem indexu  $C_{pk}$  je porovnat vzdálenost střední hodnot s jednotlivými hranicemi tolerančního intervalu. Pokud by nastal případ, že nějaká z hodnot  $C_{pU}$  nebo  $C_{pL}$  vyjde záporně, položí se rovna nule. Toto však nastane pouze v případě, kdy střední hodnota  $\bar{x}$  neleží v tolerančním intervalu, což znamená, že proces není správně statisticky kontrolován [66].

Hodnoty indexu  $C_{pk}$ , jako interpretace způsobilosti procesu, jsou analogií indexu  $C_p$ . Je důležité dodat, že hodnota indexu  $C_{pk}$ , která ještě zaručuje způsobilost procesu, se s neustálým rozvojem výrobních technologií zvyšuje. Současně je často požadovaná hodnota indexu  $C_{pk}$  1,33, avšak v některých firmách je hranice způsobilosti procesu ještě přísnější [66].

### 2.3 Paretova analýza

Tuto analýzu zavedl italský ekonom Vilfredo Pareto, který na základě údajů ze statistiky určil pravidlo, které říká, že 80 % problémů je způsobeno pouze 20 % příčin. Tento princip pomáhá zjistit místo, na které se zaměřit při analýze procesu uspořádáním položek podle četností výskytu do tak zvaného Paretova diagramu [67; 68].

Paretův diagram je výchozím prostředkem Paretovy analýzy. Tento diagram je velmi efektivní, snadno dostupný a lehce aplikovatelný rozhodovací nástroj v oblasti řízení jakosti. Tento diagram je sloupcový graf, který má sloupce seřazeny sestupně a zobrazuje Paretovo rozdělení. Tato analýza pomůže stanovit priority v rámci procesu řešení. Cílem analýzy je separovat podstatné faktory od těch nepodstatných a stanovit kam směřovat úsilí pro zlepšení procesu. Využití Paretovy analýzy je velmi široké. Může se uplatnit v následujících oblastech [69]:

- analýza druhů a počtu neshodných výrobků a ztrát s nimi spojených,
- analýza finančních a časových ztrát, které jsou způsobeny v důsledku výroby neshodných kusů,
- analýza reklamací z hlediska jejich důvodů a peněžních ztrát,
- analýza důvodů výroby neshodných součástí,
- analýza důvodů časových prostojů strojů,
- analýza opotřebování nástrojů,
- srovnání stavu před realizací a po realizaci opatření zaměřených ke zlepšení.

### 2.4 Metoda zlepšování Kaizen

Podstata pojmu Kaizen je jednoduchá a prostá. Jedná se o neustálé zlepšování a zdokonalování výrobního procesu, které se týká každého člena firmy. Filozofie Kaizen je založena na tom, že způsob života je zapotřebí neustále zlepšovat. Způsobem života je myšlen život pracovní nebo společenský [70].

Kaizen se týká převážně nás. Jedná se o sebezdokonalení, následně zkvalitnění vztahů a spolupráce s ostatními zaměstnanci, a nakonec zlepšení věcí a procesů kolem. Tento cyklus neustálého zlepšování se stal přirozeným jevem v Japonsku. Tato filozofie života, říká, že zítřek musí být lepší než dnešek. Základní principy tohoto systému je možné charakterizovat následovně [71]:

- Metoda Kaizen se koncentruje na zlepšení, která se opírají o zkušenosti a znalosti pracovníků ve výrobě. Tyto znalosti a zkušenosti mohou být lidem z vedení neznámy. Až 99 % všech problémů ve výrobě je pro vedení firmy neznámé a 60 až 70 % těchto problémů se dá vyřešit bez použití finančních prostředků.
- Seberealizace a vyšší uspokojení z práce je to, co Kaizen přináší jednotlivým pracovníkům. Tím se rozvíjí jejich schopnosti a zlepšuje se podniková kultura. Kaizen je atmosféra, ve které lidé přicházejí s novými návrhy pro zlepšení a následným realizováním těchto návrhů si zajišťují svá pracovní místa.

- Lepší je nechat vlastní zaměstnance vymýšlet a realizovat řešení problémů a následně je finančně odměnit než zvát externí firmy, aby provedly odstranění problémů. Řešení problémů, které přinesou externí firmy jsou potom ve výrobě i hůře akceptovatelné.
- Je dobré po zaměstnancích vyžadovat nejen pracovní nasazení, ale také detailnější pohled na věc. Je dobré, aby se lidé dívali kolem sebe a odhalili možná úskalí výroby a navrhli možné řešení, jak udělat danou práci levněji rychleji a lépe.

## 2.5 Taguchiho metoda

Konceptem Taguchiho metody je mohutný design založený na navrhování výrobního procesu nebo produktu tak, aby výroba byla méně náchylná na nekontrolovatelné změny proměnných, které jsou pro daný proces neekonomické [72]. Této skutečnosti je dosahováno pomocí řízených experimentů, pomocí kterých lze posuzovat vliv jednotlivých proměnných na kvalitu výroby [73].

Taguchiho metody lze zařadit do statistických metod, které zlepšují kvalitu procesu. Přístup této metody je odlišný zejména při pohledu na kvalitu součásti, na kterou je nahlíženo v celé šířce výrobního procesu. Zejména je nutné na kvalitu výrobku nahlížet už od začátku výrobního procesu nikoli pouze na konci. Lze tedy konstatovat, že kvalita výrobního procesu musí být zaručena už v počáteční fázi výroby [73].

Taguchi nahlíží na kvalitu výrobku tak, že jejich kvalita je rozdílná, i když oba výrobky splňují meze výrobní tolerance. Jakékoliv odchýlení od stanovené tolerance je považováno za nekvalitu, která přináší zákazníkovi finanční ztráty, které se zvyšují se zvětšující se odchylkou od stanovené tolerance. Tato ztráta je podle Taguchiho nazývána ztrátou za nekvalitu v rámci výrobní tolerance [74].

Mezi základní předpoklady Taguchiho metody patří [74]:

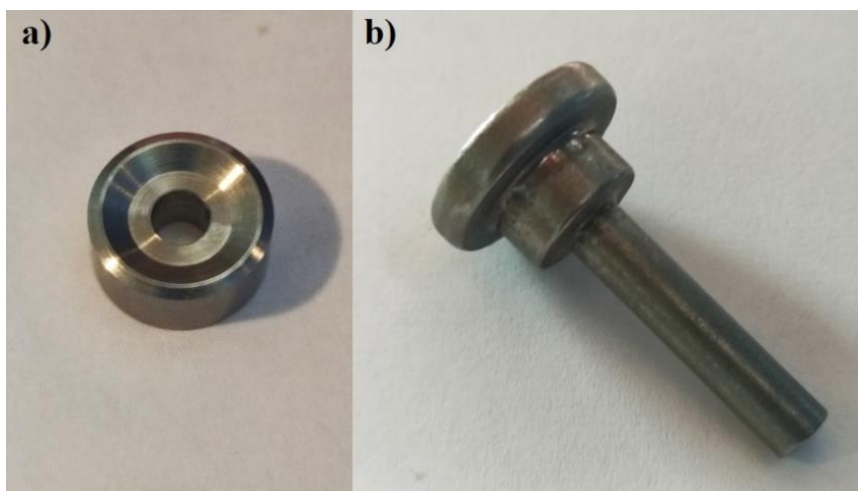
- každý výrobek má stanovenou charakteristiku (hmotnost, rozměr...), podle které se posuzuje kvalita dané součásti,
- tyto charakteristiky mají danou optimální hodnotu tolerance,
- nekvalita je projevem odchylky od stanovené tolerance,
- jakoukoliv odchylku lze považovat za ztrátu, která se projeví u zákazníka vyššími náklady na údržbu, provoz, ekologii apod.

### 3 TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY SOUČÁSTI

Technologický postup výroby daného dílu je velmi komplexní. Skládá se z přípravných operací zahrnujících přípravu polotovaru a obráběcích nástrojů. Samotný díl se skládá ze dvou dílů, které jsou před samostatným obráběcím procesem svařeny. Po svaření následuje hrubovací operace na prvním stroji výrobní linky a poté dokončovací operace na druhém stroji výrobní linky. Poté následuje očištění dílů a jejich kontrola na kontrolním automatu. Před finálním balením dílů jsou díly ještě stoprocentně zkontrolovány na vizuální kontrole. Následuje balení a expedice dílů k zákazníkovi.

#### 3.1 Příprava polotovarů.

Samotný polotovar je tvořen sestavou skládající se ze dvou dílů, tj. příruby a válce. Jednotlivé díly sestavy jsou zobrazeny na obrázku 3.1. Příruba je vyráběna na dlouhotočných šestivřetenových automatech (viz obr 3.2). Do stroje jsou ručně vkládány polotovary ve formě šestimetrových válcovaných tyčí, které jsou potom automaticky podávány do vřeten. Válec je nakupován od externího dodavatele jako výlisek vzniklý objemovým tvářením.



Obr. 3.1 Polotovary: a) příruba, b) válec.



Obr. 3.2 Obráběcí stroj na výrobu přírubových dílů.

### 3.1.1 Materiál příruby a válce

Výrobní materiál příruby je 1.4307 (ČSN 17249 [75]) a materiál válce je ocel 1.4511 (X3CrNb17 [76]). Chemické složení udávají tabulky 3.1. a 3.2. V případě oceli 1.4307 se jedná feriticko – austenitickou svařitelnou ocel, která je během svařování odolná proti mezikrystalické korozi. Ocel je odolná proti mezikrystalické korozi při svařování, jedná-li se o krátkodobý ohřev mezi teploty 500 °C až 700 °C. Tuto ocel lze obrábět [77; 78]. Ocel 1.4511 je stabilizovaná feritická ocel odolná proti mezikrystalické korozi ve svařeném stavu [79]. Niob zlepšuje svařitelnost a pomáhá zlepšit odolnost proti mezikrystalické korozi [76].

Tab. 3.1 Chemické složení oceli 1.4307 [80].

Označení oceli:	Chemické složení v hmotnostních %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
1.4307	≤0,03	≤0,75	≤2,0	≤0,04	≤0,015	17,5-19,0	8,0-10,0	zbytek

Tab. 3.2 Chemické složení oceli 1.4511 [76].

Označení oceli:	Chemické složení v hmotnostních %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Fe
1.4511	≤0,05	≤1,0	≤1,0	≤0,04	≤0,015	16,0-18,0	0,3-0,6	zbytek

### 3.2 Svařovací proces příruby a válce

Připravené polotovary jsou následně dopraveny na svařovací automat, který je vidět na obrázku 3.3. Na tomto obrázku jsou také vidět postranní podavače, do kterých se odděleně vkládají polotovary přírub a válců. Správná orientace kusů je zajištěna pomocí vibračních dopravníků. Dále jsou kusy pomocí vibračního dopravníku dopraveny na svářecí stůl, kde jsou pomocí měděných elektrod svařeny. Parametry svařovacího automatu udává tabulka 3.3.



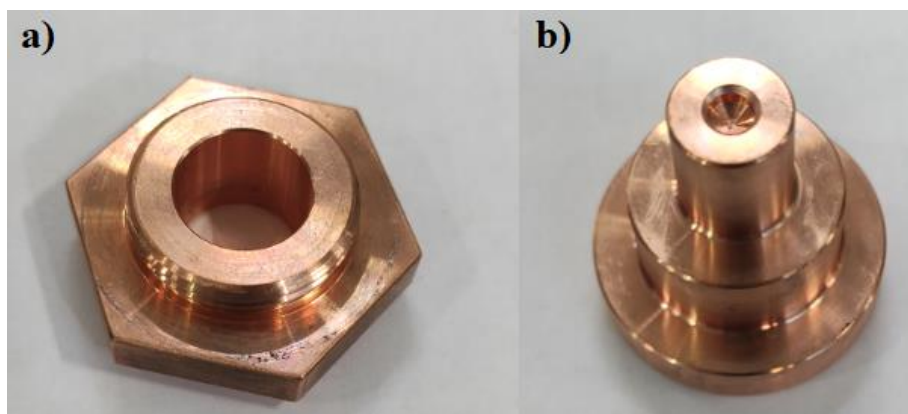
Obr. 3.3 Pohled zleva na svařovací automat.

Tabulka 3.3 Parametry svařovacího automatu.

Název:	Svařovací automat GKS-C24/2x40-Q-A
Celková hmotnost:	3 800 kg
Napájecí napětí:	3 x 400 V AC/50 Hz
Řídicí napětí:	230 V AC/24 V DC
Výkon stroje:	55 kW
Maximální svařovací energie:	24 kJ
Maximální svařovací síla:	40 kN
Rok výroby:	2019

### 3.2.1 Technologie svaření příruby a válce

Díly svou svařeny ultrapulzním odporovým svařováním. Základem ultrapulzního svařování je přeměna vysokonapětového impulzu, který je získán z baterie kondenzátoru. K vybíjení kondenzátoru dochází pomocí svařovacího transformátoru. Svar vzniká působením vysoké teploty a tlaku vzniklého svařovací přitlačnou silou, která má přesně danou velikost a je v průběhu svařování konstantní [81]. Mezi výhody ultrapulzního svařování patří malá deformace svařovaných spojů, malé tepelné ovlivnění svařovaného materiálu a dobrá pevnost spojů. Dále je možné svařovat širokou škálu stejnorodých i různorodých materiálů [82]. Svařovací elektrody jsou vidět na obrázku 3.4. Důležitá je preventivní kontrola stavu svářecích elektrod. Elektrody mají předepsanou trvanlivost, avšak někdy je potřeba elektrody vyměnit dříve, aby nedošlo ke špatnému provaření materiálu.



Obr. 3.4. Svařovací elektrody: a) spodní elektroda, b) horní elektroda.

Svařené díly jsou následně pomocí žebrového dopravníku přepraveny do připravených beden. Naplněné bedny jsou skládány na vozík, který je převezen před stroj, na kterém jsou svařené kusy obráběny. Na obrázku 3.5 je možné vidět díl po svařovací operaci.

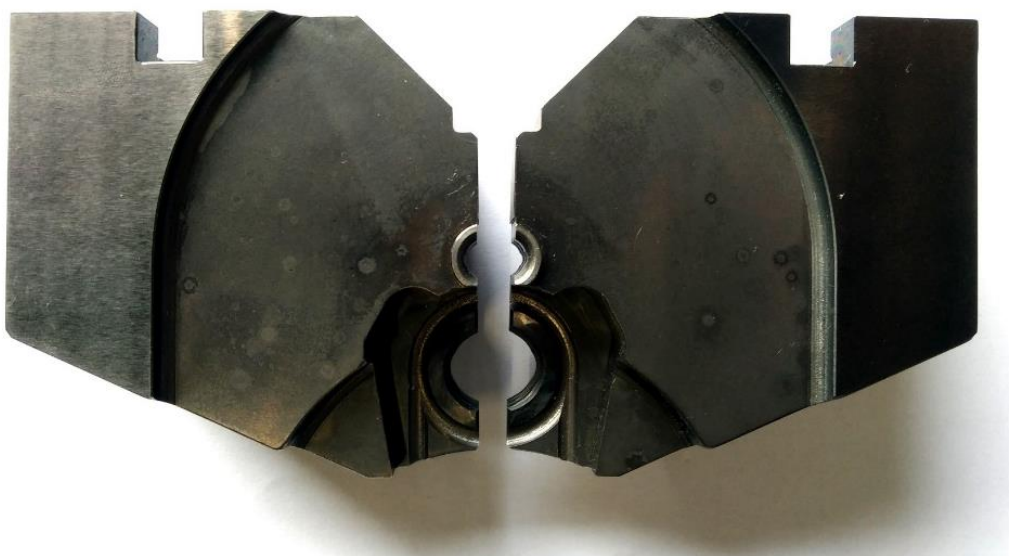




Obr. 3.5 Svařený díl.

### 3.3 Hrubování na stroji A

Svařené kusy jsou z beden vysypány na žebrový dopravník. Pomocí žebrového dopravníku jsou kusy dopraveny do vibračního dopravníku, který zajistí správné natočení kusů a pomocí skluzu jsou dopraveny až k pneumatickému automatickému podavači kusů. Kusy jsou automaticky upnuty do hydraulických upínačů. Hydraulické upínače jsou vidět na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Hydraulický upínač na upnutí kusu ve stroji A.

Kusy jsou na stroji A (viz obr. 3.7) obrobeny a následně jsou na vykládací stanici vyloženy na pásový dopravník, který dopraví kusy na vibrační dopravník, díky kterému jsou dopraveny na odebírací místo.



Obr. 3.7 Přední pohled na obráběcí stroj A.

Kusy jsou z odebíracího místa automaticky skládány do jednoúčelových palet pomocí robotického ramena. Paleta, do které jsou díly skládány, je vidět na obrázku 3.8. Pracoviště je vybaveno automatickou výměnou palet. Plné palety jsou skládány na dopravní vozík. Dopravní vozík je převezen na obráběcí stroj B, kde jsou kusy dokončeny.



Obr. 3.8 Plná paleta s obroběnými kusy ze stroje A naložená na přepravním vozíku.

Obráběcí proces je nutné kontrolovat. Kontrolovat znamená pravidelně v časovém intervalu vzít jeden kus a přeměřit ho na ručních měřidlech (viz obr. 3.9) a pokud se



některý jmenovitý rozměr blíží horní nebo dolní mezní úchylce, tak je potřeba provést korekce tohoto nástroje, který daný rozměr obrábí. Korekce se zadávají do řídicího počítače na displeji, který je vidět na obrázku 3.7. Je také nutné daný kus zkontrolovat vizuálně pod optickou lupou (viz obr. 3.9), zda se na něm nevyskytují nadměrné stopy po obrobení. Kontrola dílů probíhá pomocí stanoveného pracovního postupu. Uspořádání měřidel a optické lupy podle pracovního postupu je vidět na obrázku 3.9.



Obr. 3.9 Uspořádání měřidel a optické lupy podle pracovního postupu na stroji A.

Na tomto stroji probíhá celkové hrubování kusů. Ukázka obrobeného kusu na stroji A je vidět na obrázku 3.10. Na díle jsou na tomto stroji dva rozměry dokončeny. Jeden z rozměrů funguje jako technologická základna pro upínání na dokončovací stroj B.



Obr. 3.10 Obrobený kus ze stroje A.

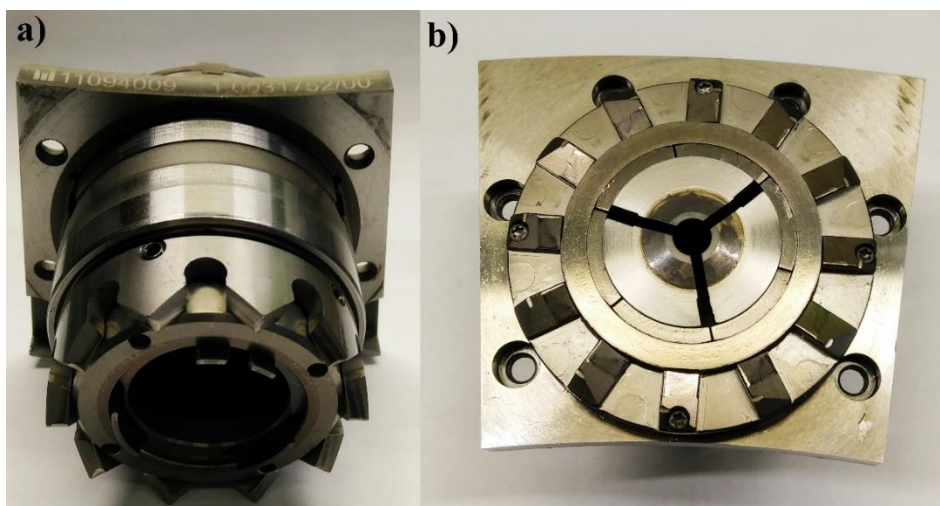
### 3.4 Dokončení na stroji B

Jak bylo zmíněno výše, vozíky jsou s obrobenými díly převezeny na dokončovací stroj B. Na dokončovacím stroji (viz obr. 3.11) jsou palety s vyhrubovanými kusy ručně vkládány na výtah palet, který je vidět v levé části obrázku 3.11. V případě, že je paleta vyprázdněna, tak automaticky dochází k její výměně za plnou.



Obr. 3.11 Přední pohled na obráběcí stroj B.

Z palet jsou kusy automaticky odebírány pomocí robotické ruky a vkládány na pásový dopravník. Na pásovém dopravníku jsou kusy seřazeny a následně jsou postupně pomocí podavače posunuty na pozici, ze které si je vezme druhý podavač a upne kusy do mechanicky upínaných kleštín. Upínací kleština je vidět na obrázku 3.12.



Obr. 3.12 Upínací kleština: a) dolní pohled, b) horní pohled.

Upnuté kusy jsou obrobena podle technologického postupu. Na poslední stanici, tj. vykládací stanici, jsou kusy odebrány pomocí pneumatického vyhazovače. Následně jsou kusy vyloženy na skluzavku, po které se dostanou až na dopravní pás. Pásový dopravník je pomocí přepážek rozdělen na jednotlivé dílčí prostory, ve kterých jsou obrobené kusy dopravovány. Každý kus má svůj prostor proto, aby při vykládání kusů a následném pohybu pásu nedošlo k vzájemnému poškození kusů. Z tohoto dopravníku jsou kusy dopraveny do vibračního dopravníku, odkud už jsou pomocí robotické ruky skládány do stejných palet jako u stroje A. Pokud na kuse po obrobení zůstanou nějaké třísky, tento kus

je identifikován rozpoznávací kamerou a následně je vyřazen na dopravník kusů s třískami. Tyto kusy jsou následně ručně skládány do palet.

Stejně jako u stroje A je i zde během obráběcího procesu nutné provádět kontrolu v pravidelném časovém intervalu. Kontrola je jak rozměrová, tak vizuální pod optickou lupou, která je vidět na obrázku 3.13.



Obr. 3.13 Detailnější pohled na optickou lupou používanou pro vizuální kontrolu kusů.

Rozměry jsou kontrolovány měřidly, která jsou vidět na obrázku 3.14. Používané měřidlo je posuvný digitální výškoměr a digitální dutinoměr. Pokud je nalezen rozměr, který se blíží horní nebo dolní toleranci jmenovitého rozměru, tak je nutné, aby byl proveden zásah obsluhou stroje. Zásah se provede v podobě nastavení rozměrové korekce na nástroji. Korekce se zadávají do řídicího programu přímo na obrazovce. Rozměrové korekce nástrojů je nutné provádět se zvětšujícím se opotřebením na nástroji.



Obr. 3.14 Měřidla používaná pro pravidelnou kontrolu kusů na stroji B.

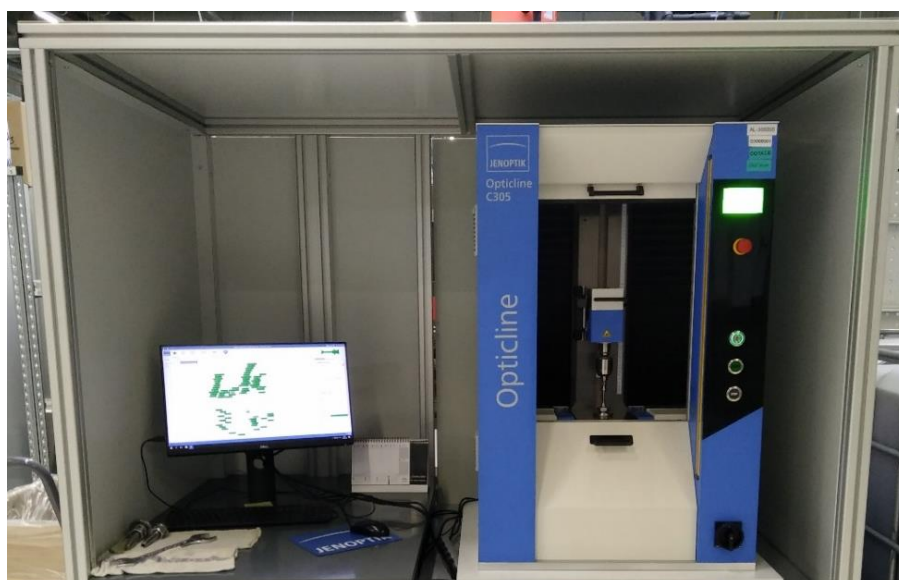


Každý řezný nástroj má svou předepsanou životnost. Pokud nějaký nástroj dosáhne stanovené životnosti, je nahrazen za nový. Nové nástroje jsou předem upnuty do náhradních držáků a zaměřeny na měřicím přístroji (viz obr. 3.15). Nástroje jsou připraveny předem, aby daná výměna nástroje byla co nejkratší.



Obr. 3.15 Přístroj pro zaměření řezných nástrojů.

Jednou za určitý časový interval dochází k celkové rozměrové kontrole kusu na optickém měřicím zařízení (viz obr. 3.16, více informací o měřicím zařízení na odkaze [83]). K měření dochází, pokud nastala výměna nástroje za nový a je potřeba nastavit rozměrové korekce nástroje. Do optického zařízení se vloží kus a podle nahraného programu dojde ke změření a vyhodnocení všech rozměrů. Tato kontrola je provedena zejména proto, že ručními měřidly není možné změřit všechny důležité rozměry. Dokončený kus ze stroje B je vidět na obrázku 3.17.



Obr. 3.16 Optický měřicí přístroj Opticline.



Obr.3.17 Dokončený kus ze stroje B.

### 3.5 Odmaštění kusů od oleje

Dokončené kusy naložené v paletách jsou na vozíku převezeny na další operaci, kterou je praní. Kusy jsou během obrábění chlazeny řezným olejem. Olej, který na kusech zůstane, je nutné odstranit, aby mohlo dojít k rozměrové kontrole kusů. Na pračce jsou palety s kusy ručně naloženy na válečkový dopravník. Dopravník kusy doveze do definovaného prostoru pračky, kde jsou kusy automatickým cyklem vyprány a následně sušeny. Usušené kusy v paletách jsou opět válečkovým dopravníkem dopraveny na místo, kde jsou ručně skládány na vozíky. Pračka je vidět na obrázku 3.18.



Obr. 3.18 Přední pohled na pračku kusů obrobených strojem B.

### 3.6 Ruční odstraňování přebytečných třísek z kusů

Vyprané kusy jsou v paletách převezeny na ruční pracoviště, kde jsou všechny kusy kontrolovány, zda na nich nezůstala tříska po obrobení. V případě nalezení třísky jsou

třísky odstraněny pomocí pinzety. Kusy nesmějí obsahovat žádné třísky, protože při automatické kontrole na kontrolním automatu by mohlo dojít k poškození měřicích kamer, snímačů nebo by daný kus byl kontrolním automatem vyhodnocen jako neshodný. Ruční pracoviště na odstraňování třísek je vidět na obrázku 3.19.



Obr. 3.19 Ruční pracoviště na odstraňování třísek z obrobků.

### 3.7 Rozměrová kontrola kusů na měřicím automatu

Další operací je kontrola přesnosti rozměrů na automatickém měřicím automatu. Palety s díly jsou rovnány na výtah, jako v případě dokončovacího stroje. Kusy jsou z palet automaticky odebírány pomocí robotické ruky a vkládány na kontrolní stůl. Každý kus projde automatickou kontrolou. Na konci měřicího cyklu je kus robotem vložen buď mezi shodné kusy, popřípadě je vložen do palety, která je určena pro neshodné kusy. Paleta určená pro neshodné kusy je pomyslně rozdělena na řady. Každá řada je určená pro jiný typ vady. Toto opatření bylo zavedeno z důvodu jednoduššího analyzování jednotlivých druhů chyb. Kontrolní automat je rozdělen na dva pracovní cykly. Každý z cyklů je obsluhován vlastní robotickou rukou. Pracoviště je zcela automatizované, až na ruční vkládání a vykládání palet s kusy do výtahu. Měřicí automat je vidět na obrázku 3.20.



Obr. 3.20 Přední pohled na měřicí automat pro rozměrovou kontrolu kusů.

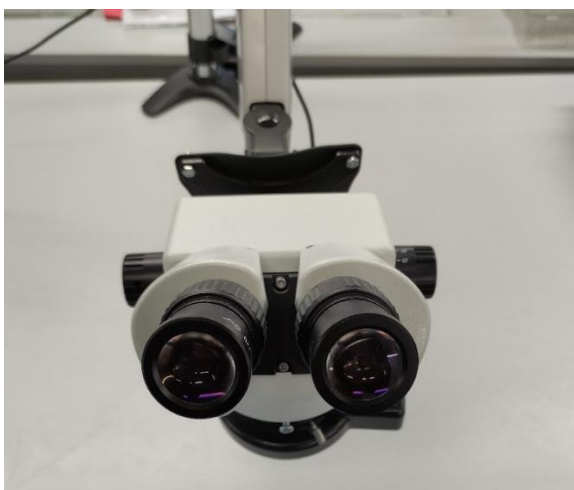


### 3.8 Praní kusů

Kusy jsou po rozměrové kontrole převezeny opět na praní. Praní probíhá stejným technologickým postupem a na stejném stroji jako v prvním případě, který byl popsán v kapitole 3.5.

### 3.9 Vizuální kontrola kvality obrobených kusů

Vyprané kusy v paletách jsou převezeny na vizuální kontrolu kvality. Zde jsou kusy stoprocentně kontrolovány pod optickou lupou. Používaná optická lupa je vidět na obrázku 3.21. V případě, že je nalezen kus s povrchovou vadou, dojde buď k jeho opravě, nebo k vyřazení kusu mezi neshodné díly. Díly se opravují pomocí smirkového papíru nebo pilníku. Mezi opravitelné vady patří nálitky, otřepy a malé otluky. Mezi neopravitelné vady jsou řazeny velké otluky a špatná vlnitost povrchu.



Obr. 3.21 Optická lupa používaná pro vizuální kontrolu kusů.

Vizuálně zkontrolované kusy jsou vkládány do plastových krytů (viz obr. 3.22). Plastové kryty jsou zabaleny do beden a bedny jsou skládány na paletu. Následně jsou kusy na paletách odvezeny zákazníkovi.



Obr. 3.22 Kusy v plastovém krytu připravené k expedici.

## 4 OPTIMALIZACE VÝROBNÍHO PROCESU, ANALÝZA A SBĚR DAT

Analýza a sběr dat byly provedeny na výrobním stroji B (viz kapitola 3.4) pro konkrétní hrubovací operaci. Obráběným materiálem byl druhý díl sestavy, tj. válec, popsán v kapitole 3.1.1, upínání obrobku viz kapitola 3.4. Používané nástroje budou popsány v dalších kapitolách.

### 4.1 Používaná měřicí zařízení

Vzniklé opotřebení na řezných nástrojích bylo nasnímano na mikroskopu ZEISS Stemi 2000-C. Dané pracoviště s používaným mikroskopem je vidět na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Používaný mikroskop ZEISS 2000-C.

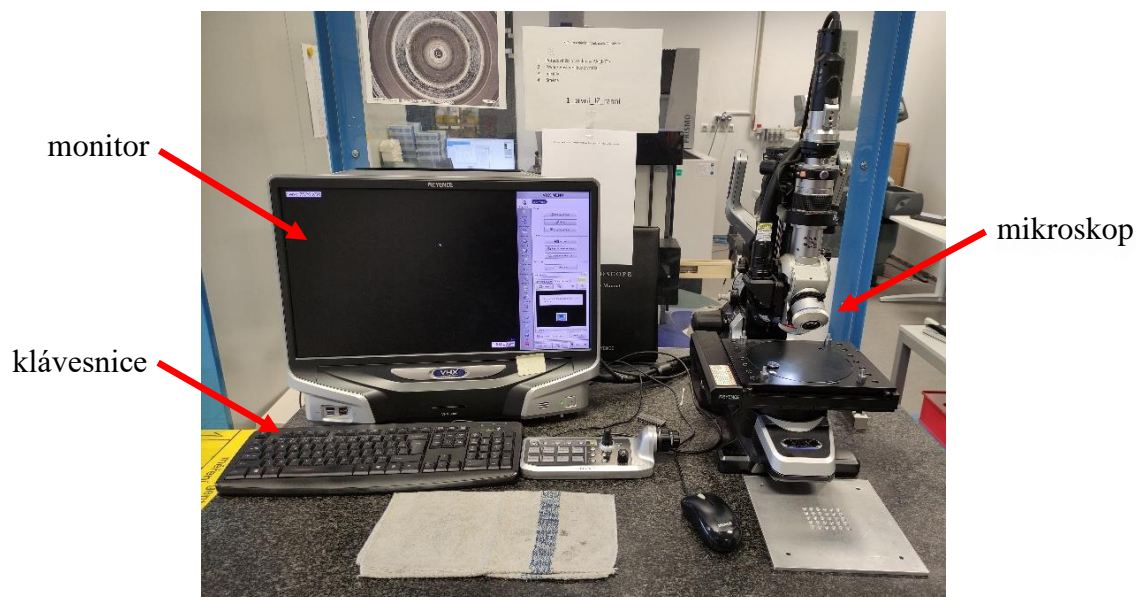
Drsnost povrchu byla měřena na konturografu T4. Zde byly pomocí diamantového hrotu nasnímány jednotlivé povrchy a následně vyhodnoceny drsnosti povrchu. Konturograf je možné vidět na obrázku 4.2



Obr. 4.2 Používaný konturograf T4.



Opotřebení destiček konkrétně opotřebení na čele a hřbetě nástroje bylo měřeno na mikroskopu KEYENCE (viz obr. 4.3). Dále zde byla nafocena část obrázků, které jsou použity v této práci.



Obr. 4.3 Používaný mikroskop KEYENCE.

Tvar geometrie stopkových fréz byl nasnímán na přístroji Alicona Infinite Focus-G5 (viz obr. 4.4). Dále na tomto přístroji bylo provedeno měření geometrie břitů destiček.



Obr. 4.4 Používaný měřicí přístroj Alicona Infinite Focus-G5.

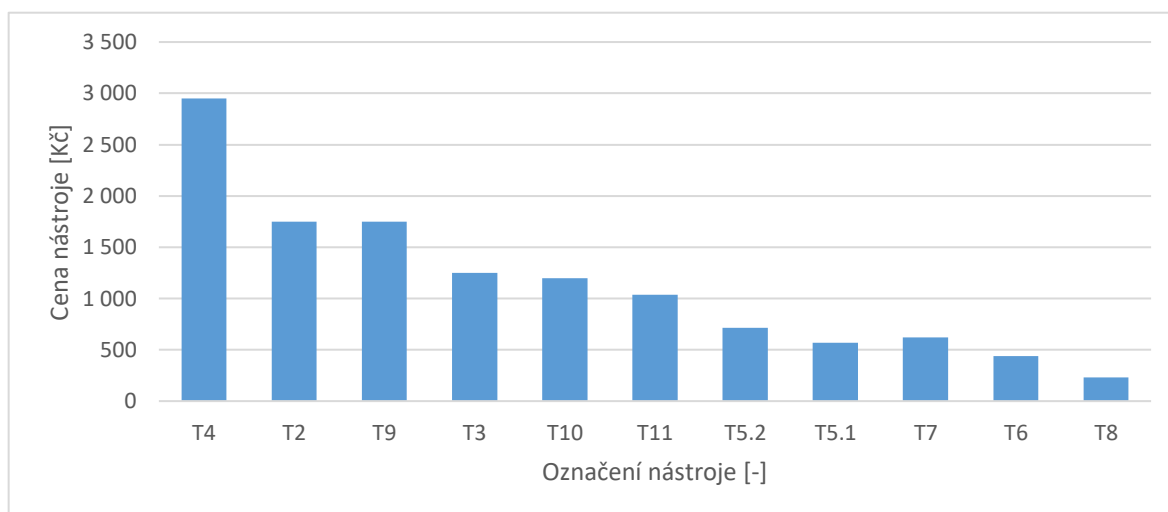
## 4.2 Analýza a sběr dat z výrobního procesu na stroji B

Před tím, než započne proces optimalizace, je vhodné si nejprve daný výrobní proces zmapovat. Zmapování se týká všeho, co s výrobním proces nějakým způsobem souvisí. Jedná se o samotný výrobní proces a s ním spojené náležitosti, jako jsou životnosti nástrojů, jednotlivé taktory výrobních stanic na výrobní lince, ceny nástrojů atd. Může se

také jednat například o proces upínání kusů, správné utváření třísky a odvádění třísky z místa řezu, přeprava kusů mezi jednotlivými stroji a mnoho dalšího. Důkladná analýza a sběr dat přinesou závěry, ze kterých jsou vybrána konkrétní místa, na které se zaměří optimalizační proces.

#### 4.2.1 Analýza nákladů jednotlivých nástrojů používaných na stroji B

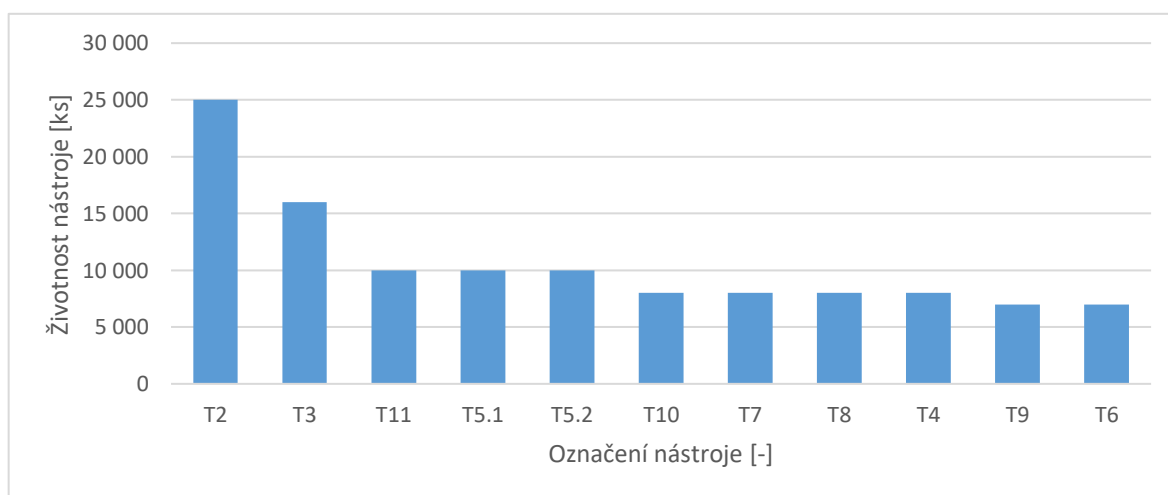
Pomocí grafu (viz obr. 5) byly vyneseny ceny pro jednotlivé nástroje používané na dokončovacím stroji B. Označení nástrojů je podle toho, na jaké stanici obrábí. Stanice číslo pět je obsluhována dvěma nástroji, tj. T5.1 a T5.2. Používanými nástroji jsou frézy, vrtáky a soustružnické nože. Ze vzniklého grafu vyplývá, že nejdražším nástrojem je nástroj T4. Následuje nástroj T2 a jako třetí je nástroj T9.



Obr. 4.5 Graf pro jednotlivé ceny nástrojů.

#### 4.2.2 Analýza životnosti jednotlivých nástrojů používaných na stroji B

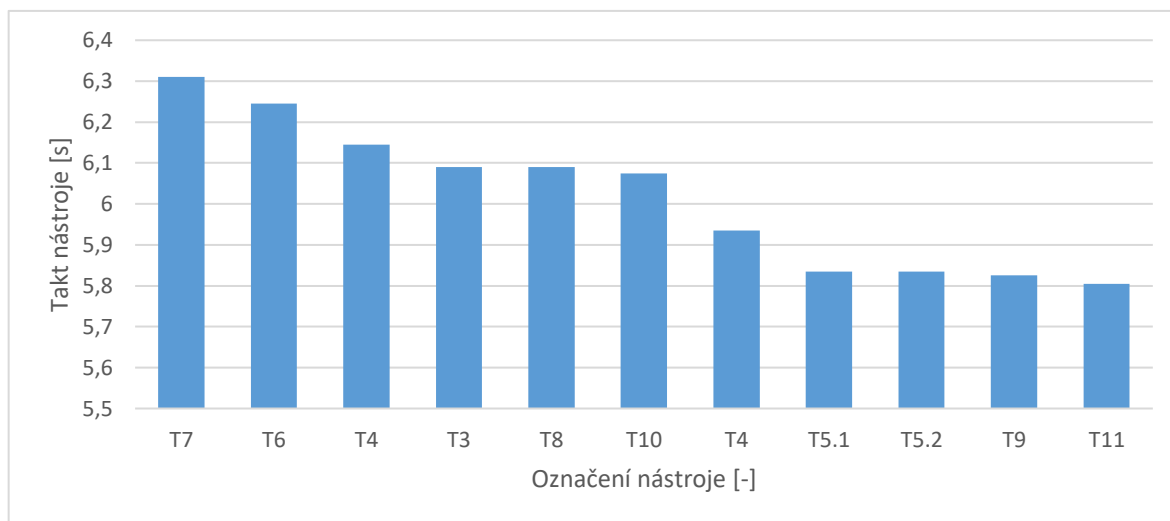
Pomocí grafu (viz obr. 4.6) jsou vyneseny životnosti pro jednotlivé nástroje používané na stroji B. Je použita životnost, a ne trvanlivost nástrojů, protože používané řezné nástroje nemají možnost přebroušení. Nástroje s nejmenší životností jsou nástroje T6 a T9. Následují nástroje T4, T7, T8 a T10.



Obr. 4.6 Graf pro jednotlivé životnosti nástrojů.

### 4.2.3 Analýza délky taktů jednotlivých nástrojů používaných na stroji B

Na obrázku 4.7 je vidět graf, který znázorňuje takty jednotlivých nástrojů, které jsou používány na stroji B. Je vidět, že mezi nástroje s nejdelšími takty patří nástroje T7, T6 a T4.



Obr. 4.7 Graf pro jednotlivé takty nástrojů.

Z vykreslených grafů vyplývá, že vhodným nástrojem k optimalizaci je nástroj T4. Tento nástroj má nejvyšší cenu a zároveň malou životnost při porovnání s ostatními nástroji. Jeho takt je také jeden z delších. Tyto náležitosti vedou k výběru nástroje T4. V další části bude následovat vyhodnocení používaného nástroje T4 a následně popis a vyhodnocení zavedeného nového nástroje jakožto náhradu za nástroj T4.

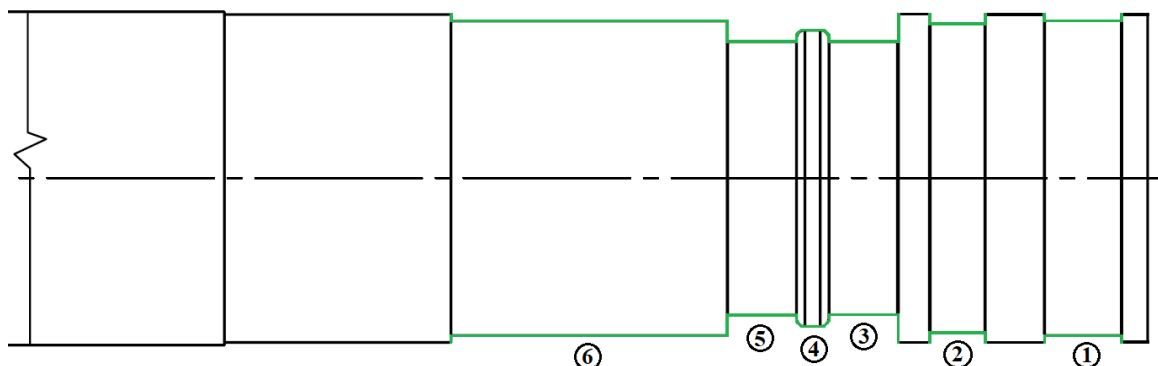
### 4.3 Analýza a sběr dat hrubovacího nástroje T4

Jedná se o hrubovací nástroj, který je vidět na obrázku 4.8. Tento nástroj je složený ze dvou částí. První část je tvořena tělem držáku, které se upíná do stroje pomocí kužele HSK 25C. Druhou částí je vyměnitelná hlava. Společně tvoří držák nástroje pro devět vyměnitelných břitových destiček (VBD). Jednotlivé destičky jsou pomocí šroubků mechanicky připevněny k hlavičce a ta k tělu držáku.



Obr. 4.8 Obrázek hrubovacího nástroje T4.

Tvar nástroje je přizpůsobený omezenému prostoru v upínací kleštině. Za současného otáčení nástroje a obrobku dojde k hrubovacímu procesu v dolní části kusu. Plochy, které musí nástroj obrobit, je možné vidět na obrázku 4.9. Jedná se o plochy, které obsahují zápichy i přechody průměrů. Celá takto vyhrubovaná část dřívku je v následujících operacích dokončena.



Obr. 4.9 Obráběné plochy v dolní části kusu pomocí hrubovacího nástroje.

#### 4.3.1 Popis nástroje a používané řezné podmínky

Materiál řezného nástroje je povlakovaný slinutý karbid. Další informace o řezném nástroji jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tab. 4.1 Označení používaných VBD.

Označení	Počet VBD v držáku [ks]	Šířka břitu [mm]	Materiál VBD	Povlak
VBD	9	0,7	slinutý karbid třídy M	TiN

Používané řezné podmínky jsou znázorněny v tabulce 4.2. Otáčky obrobku i nástroje jsou společně s posuvem na otáčku konstantní během celého hrubovacího procesu. Šířka záběru ostří je během obrábění po částech konstantní. Mění se podle daného obráběného úseku jedna až šest, které jsou vyznačeny na obrázku 4.9. Třetí a pátý úsek mají stejnou hodnotu šířky záběru ostří.

Tab. 4.2 Používané řezné podmínky při hrubování.

Otáčky obrobku $n_1$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Otáčky nástroje $n_2$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Posuv na otáčku $f$ [mm]	Maximální šířka záběru ostří $a_p$ [mm]
1 055	4 000	0,05	0,51

#### 4.3.2 Výpočty strojních časů a počtu obdržených rázů

##### Jednotkový strojní čas

Jednotkový strojní čas při hrubování kontury byl vypočítán podle vztahu (4.1). Jednotkové časy byly počítány samostatně pro jednotlivé úseky jedna až šest. Avšak úsek tři, čtyři a pět byl spojen v jeden celkový z důvodu toho, že oba zápichy jsou rozměrově identické. Písmeno  $L$  představuje dráhu, která je v tomto výpočtu uvažována bez nájezdů a přejezdů. Tabulka 4.3 ukazuje jednotlivé délky hrubovaných úseků.

Tab. 4.3 Jednotlivé délky hrubovaných úseků.

$L_1$ [mm]	$L_2$ [mm]	$L_{3-5}$ [mm]	$L_6$ [mm]	$L_c$ [mm]
0,61	0,21	2,97	5,375	9,165

Obecný vztah pro výpočet jednotkového strojního času je následující [53]:

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} = \frac{L}{n_2 \cdot f} \quad (4.1)$$

Tabulka 4.4 obsahuje vypočítané hodnoty časů pro všechny úseky obrábění. Ukázka výpočtu pro první úsek:

$$t_{AS1} = \frac{L_1}{v_f} = \frac{0,61}{4000 \cdot 0,05} = 0,003 \text{ min} = 0,018 \text{ s}$$

Tab. 4.4 Vypočítané hodnoty strojních časů pro jednotlivé hrubovací úseky.

$t_{AS1}$ [s]	$t_{AS2}$ [s]	$t_{AS3-5}$ [s]	$t_{AS6}$ [s]	$t_{ASC}$ [s]	$t_{AS8000}$ [min]
0,183	0,063	0,891	1,613	2,750	366,6

#### Počet obdržených rázů během obráběcího procesu

Jelikož se jedná o přerušovaný řez, tak každá destička je vystavena určitému množství rázů během hrubovacího procesu. Výpočet rázů byl proveden pro jednotlivé úseky. Opět došlo při výpočtu ke sloučení úseku tři, čtyři a pět. Počet rázů byl počítán podle vztahu 4.2.

$$R = t_{AS} \cdot n = t_{AS} \cdot (n_1 + n_2) \quad (4.2)$$

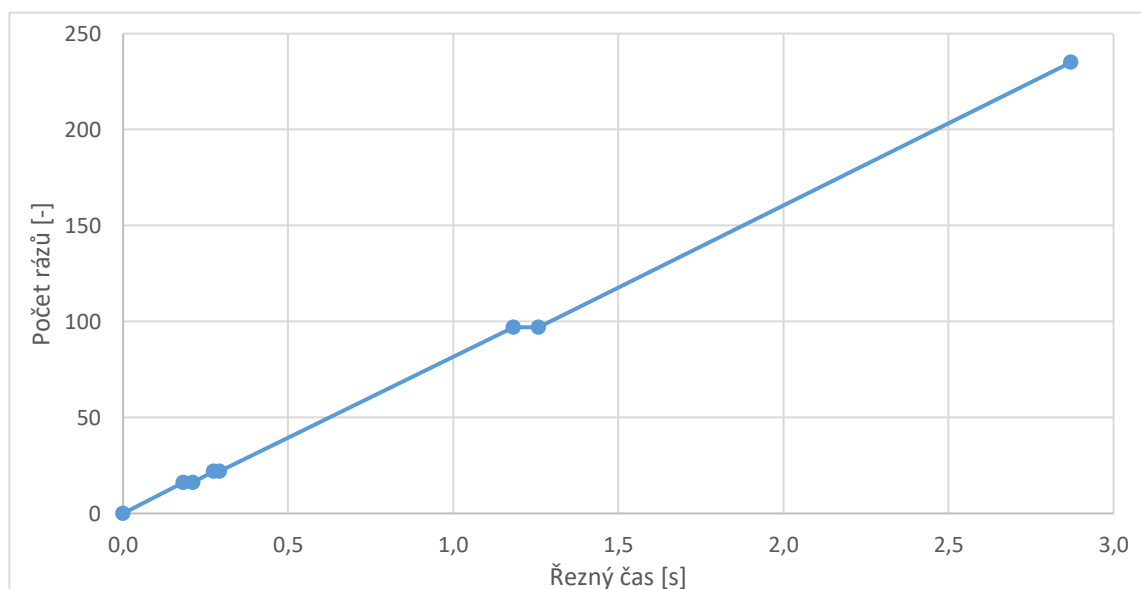
Tabulka 4.5 obsahuje vypočítané hodnoty rázů pro všechny úseky obrábění. Otáčky jsou převedeny na odpovídající jednotky tj  $s^{-1}$ . Ukázka výpočtu pro první úsek:

$$R_1 = t_{AS1} \cdot n = t_{AS1} \cdot (n_1 + n_2) = 0,183 \cdot 84,25 = 15,42 = 16 [-]$$

Tab. 4.5 Vypočítané hodnoty obdržených rázů pro jednotlivé hrubovací úseky.

$R_1$ [-]	$R_2$ [-]	$R_{3-5}$ [-]	$R_6$ [-]	$R_{C1}$ [-]	$R_{C8000}$ [-]
16	6	75	136	233	1 864 000

Počty rázů vycházejí jako desetinné číslo, což znamená, že jednotlivé destičky v nástrojovém držáku neobdrží stejné množství rázů během vyhrubování jednoho kusu. Avšak při celkovém počtu rázů je tato skutečnost zanedbatelná. Lze tedy říct, že všech devět destiček je vystaveno během hrubování stejnému množství rázů. Obrázek 4.10 ukazuje grafickou závislost vzniklých rázů na rezném čase. Vodorovné vzdálenosti znázorněné v grafu představují časy přejezdů nástroje mezi jednotlivými hrubovanými úseky.

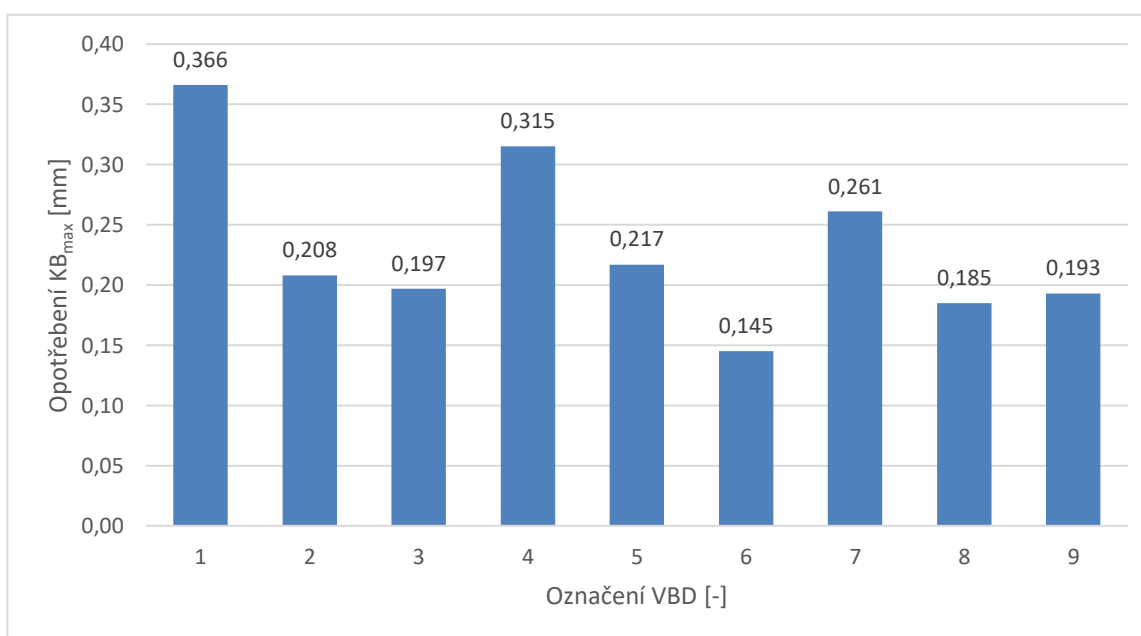


Obr. 4.10 Průběh rázů v průběhu řezného času pro jeden obrobený kus.

#### 4.3.3 Vyhodnocení vzniklého opotřebení hrubovacího nástroje T4

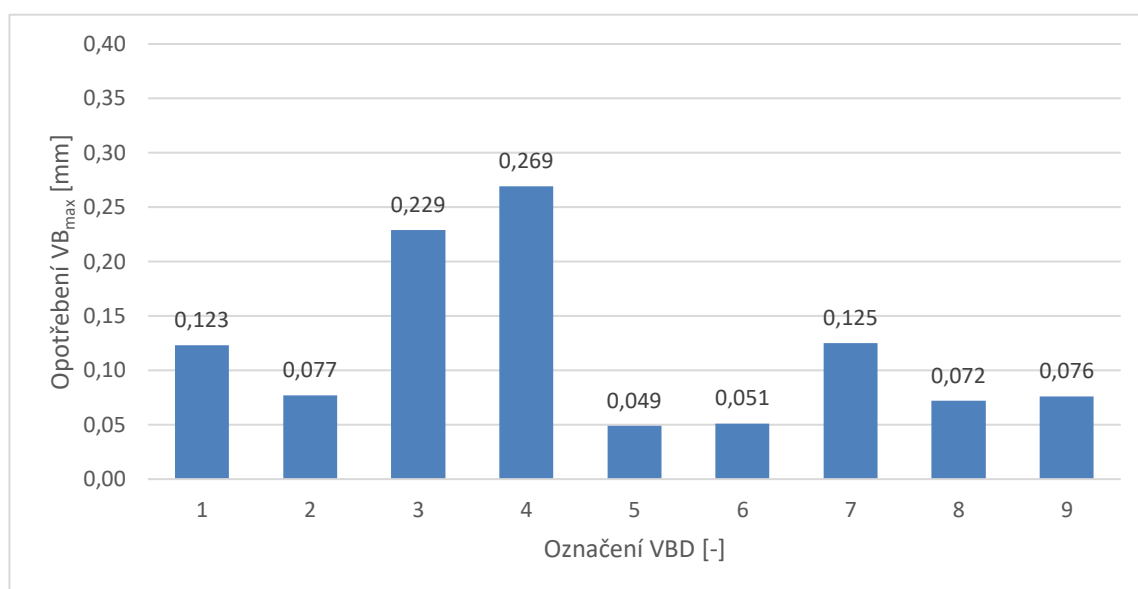
Opotřebení na konci životnosti na jednotlivých destičkách bylo nafoceno na mikroskopu ZEISS 2000-C a změřeno na mikroskopu KEYENCE (viz kapitola 4.1). Měření opotřebení proběhlo tak, že každá z devíti destiček byla vyfocena a následně bylo opotřebení změřeno jako vzdálenost dvou bodů nebo dvou přímek. Vyhodnocení probíhalo na destičkách, které byly opotřebeny. Změřené hodnoty opotřebení byly zapisovány do tabulky (viz příloha 1) a dále vyneseny do grafů.

Na obrázcích 4.11 a 4.12 jsou znázorněny příslušné grafy s vnesenými hodnotami pro danou formu opotřebení. Obrázky, na kterých bylo provedeno měření, jsou uvedeny v tabulce 4.7.



Obr. 4.11 Zobrazené opotřebení na čele pro jednotlivé destičky na konci své životnosti.






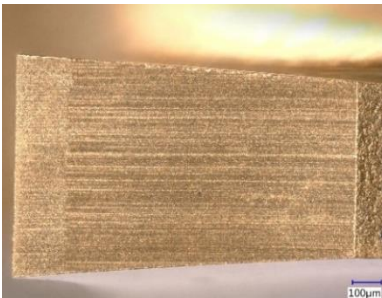

Obr. 4.12 Zobrazené opotřebení na hřbetě pro jednotlivé destičky na konci své životnosti.

Jak je možné vidět na obrázku 4.11, čelní opotřebení není na všech destičkách zcela rovnoměrné. Největší opotřebení dosahuje hodnoty 0,366 mm naopak nejmenší hodnota opotřebení je 0,145 mm. Průměrná hodnota opotřebení dosahuje 0,232 mm. Z těchto hodnot je možné říct, že jednotlivé břity nejsou namáhány stejným zatížením během obrábění, což má za následek tyto rozdíly ve vzniklém opotřebení. Tato skutečnost může být vysvětlena tím, že vyměnitelná hlava, ve které jsou destičky upnuty, má opotřebovaná jednotlivá lůžka destiček. Přičemž každé lůžko je opotřebované jinak, což způsobí rozdílné ustavení vyměnitelných destiček v držáku, a tudíž jinou geometrii nastavení břitu vůči obrobku.

Opotřebení na hřbetě je znázorněno na obrázku 4.12. Opět lze konstatovat, že opotřebení na jednotlivých destičkách není rovnoměrné, což lze přisoudit stejnému faktu, jako u čelního opotřebení. Největší hodnota hřbetního opotřebení je 0,269 mm a nejmenší je 0,049 mm. Průměrná hodnota hřbetního opotřebení je 0,119 mm. V průměru je tedy hřbetní opotřebení o 0,113 mm menší než opotřebení na čele.

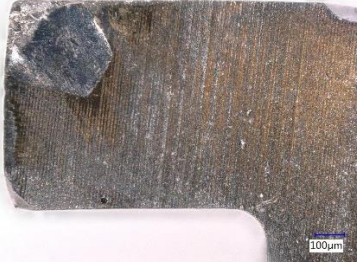






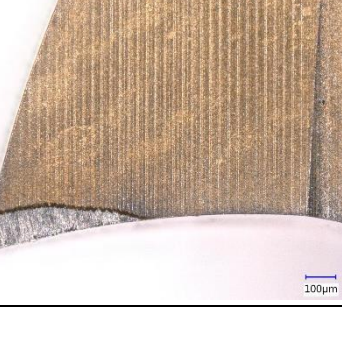
Vzniklé opotřebení na čelní a hřbetní ploše po konci životnosti bylo nasnímáno na mikroskopu ZEISS 2000-C při šestinásobném zvětšení a na mikroskopu KEYENCE při zvětšení dvacetinásobném. V tabulce 4.6 jsou znázorněny fotografie nové destičky.

Tab. 4.6 Nasnímané fotografie nové destičky.

Čelní plocha $A_\gamma$	Hřbetní plocha $A_\alpha$	Hřbetní plocha $A'_\alpha$
		


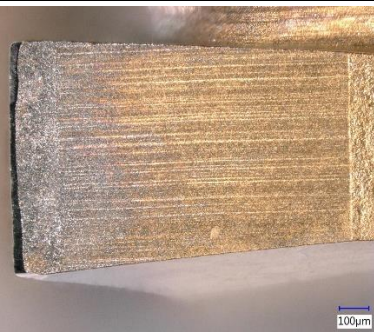








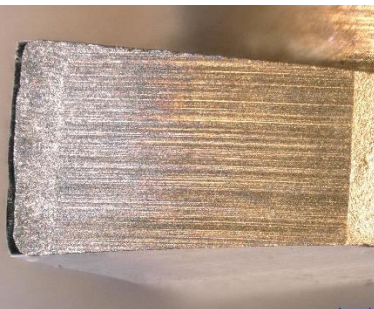

V následující tabulce 4.7 je znázorněno opotřebení jednotlivých břitů.

Tab. 4.7 Nasnímané fotografie vzniklého opotřebení a částic otěru z obráběného materiálu.

	Čelní plocha $A_\gamma$	Hřbetní plocha $A_\alpha$	Hřbetní plocha $A'_\alpha$
1			
2			
3			
4			
5			



Pokračování tabulky 4.7.

	Čelní plocha $A\gamma$	Hřbetní plocha $A\alpha$	Hřbetní plocha $A'\alpha$
6			
7			
8			
9			

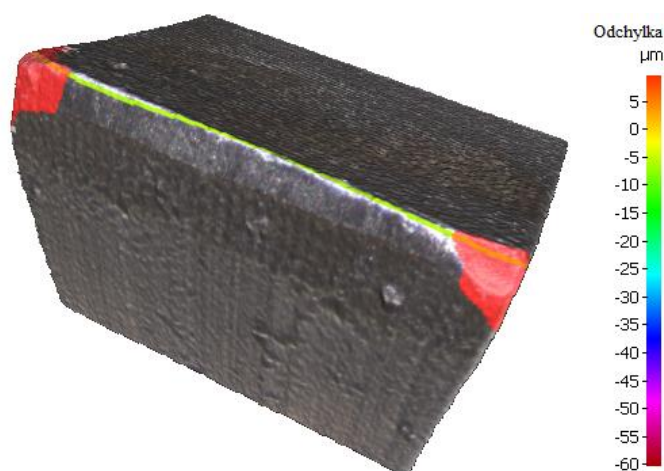
U destiček 1, 3, 4 a 7 je znatelný křehký lom bříty, který značně ovlivnil velikost čelního i hřbetního opotřebení destičky. Tento lom je pravděpodobně způsobený mechanickým zatížením kolísajících složek celkové síly. Břity jsou namáhány mechanickými rázy, které jsou způsobeny přerušovaným řezem. Křehký lom bříty mohl být také zapříčiněn vlivem malé tuhosti bříty způsobené pozitivní geometrií a malým rádiusem špičky.

Čelní opotřebení na jednotlivých destičkách není rovnoměrné. Destičky 1–5 a destička 7 vykazují výrazné opotřebení na čele v podobě výmolů. Destičky 6, 8 a 9

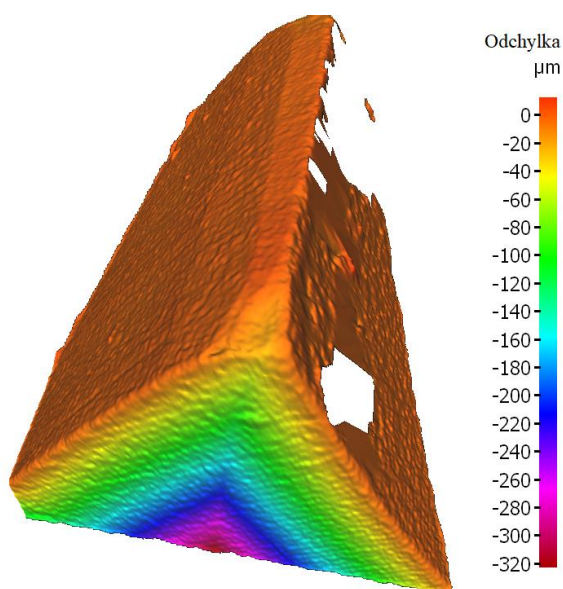
nevykazují zdaleka tak velké čelní opotřebení. Destičky 2, 6, 7 jsou opotřebeny i v dolní části bříty. Tyto výrazné změny v opotřebení lze vysvětlit opět nerovnoměrným opotřebením lůžek vyměnitelné hlavy. Navíc jsou břity během obrábění vystaveny proměnnému zatížení. Tato změna zatížení je způsobena měnící se šířkou záběru ostří během hrubování jednotlivých úseků. Tento fakt přispívá ke vzniku čelního opotřebení.

Opotřebení na hřbetě dosahuje výrazně menších rozměrů než čelní opotřebení. Pokud by na břitech 1, 3, 4 a 7 nedošlo k lomu bříty, tak by hřbetní opotřebení vykazovalo rovnoměrný charakter. Díky pozitivní geometrii bříty nedochází k takovému otěru na hřbetu, což má za následek malé hodnoty hřbetního opotřebení. Opotřebení na sekundárním hřbetě je abrazivní nebo křehké porušení bříty. Abraze je výrazná u bříty číslo 5, 6, 8. Křehké porušení bříty je u stejných destiček jako v předchozích případech.

Jak na čelní, tak na hřbetní ploše je patrné, že docházelo ke vzniku tepelně ovlivněné oblasti. Na všech obrázcích je patrný přechod mezi původním povlakem destičky a tepelně ovlivněnou oblastí, kde byl povlak během obrábění odstraněn. Detailní nasnímání destičky 9 bylo provedeno na přístroji Alicona (viz obr. 4.13 a 4.14).



Obr. 4.13 Zobrazení bříty destičky 9 na konci životnosti.

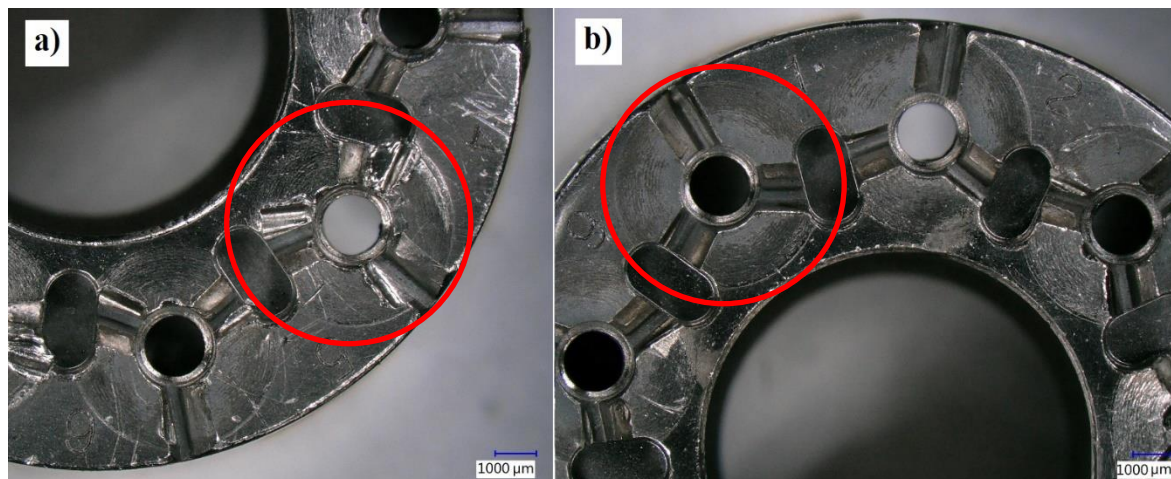


Obr. 4.14 Zobrazení špičky destičky 9 na konci životnosti.



Na obrázcích 4.14 a 4.15 je opotřebení převážně ve formě otěru podél celého hřbetu destičky. Na obou špičkách nástroje došlo k výraznému opotřebení. Toto opotřebení může být způsobeno malou tuhostí bříty, která je způsobena úhlem hřbetu, který je přibližně  $14,5^\circ$  a úhlem čela, který je  $10^\circ$ . Lze konstatovat, že geometrie bříty má pozitivní charakter, což pro hrubovací operaci nemusí být příliš vhodná volba. Další obrázky změřeného opotřebení a geometrie opotřebovaného bříty tvoří přílohu 2 této práce.

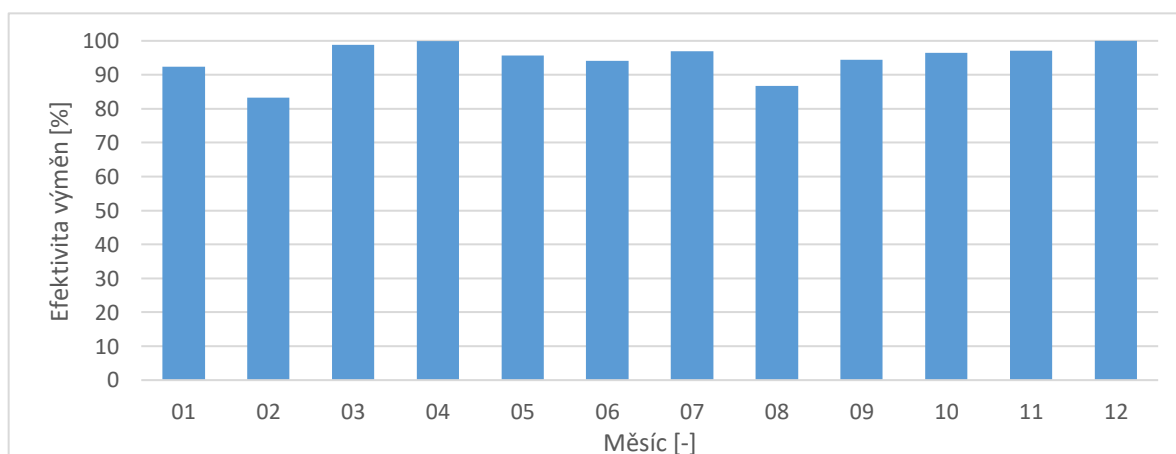
Na obrázku 4.15 je vidět vyměnitelná hlava bez upnutých destiček. Je vidět názorný rozdíl v opotřebení jednotlivých lůžek.



Obr. 4.15 Detail vyměnitelné upínací hlavy: a) opotřebované lůžko, b) neopotřebované lůžko.

#### 4.3.4 Vyhodnocení efektivity výměn nástroje T4

Obrázek 4.16 ukazuje efektivitu výměn nástroje T4 v jednotlivých měsících.

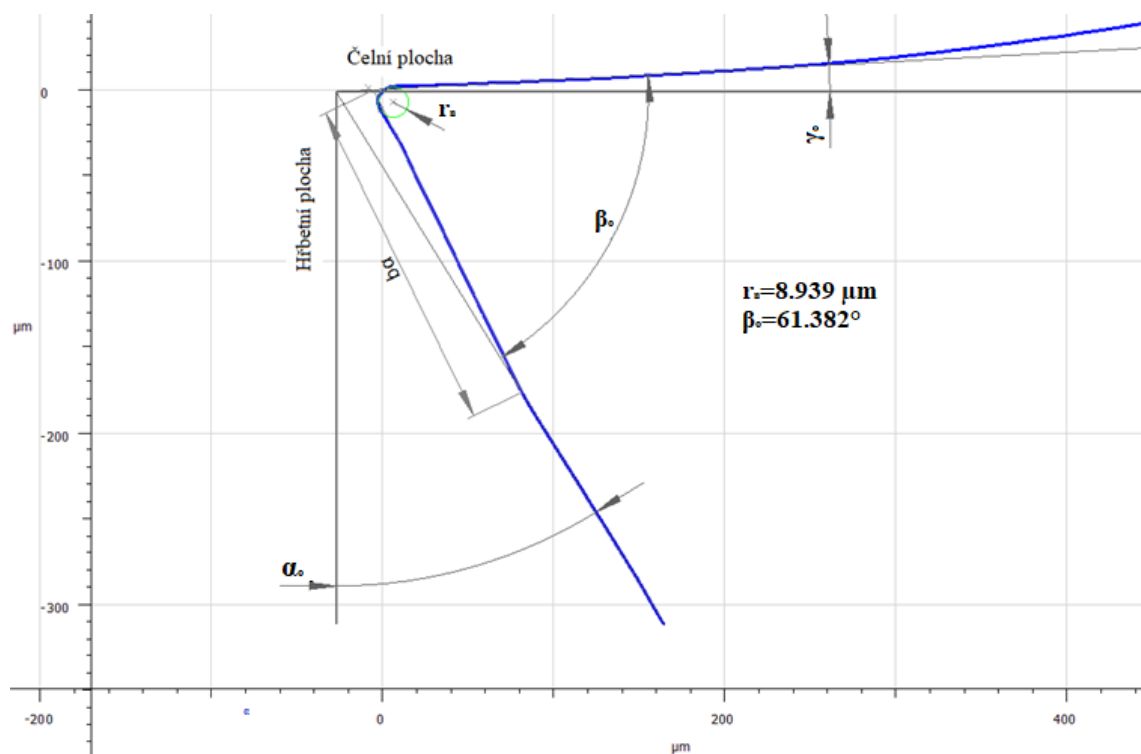


Obr. 4.16 Zobrazená efektivita výměn nástroje T4 v jednotlivých měsících.

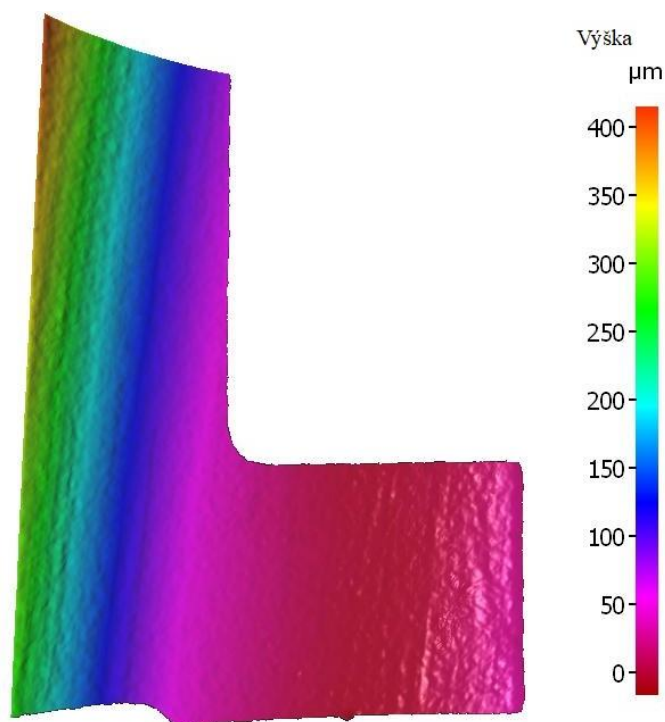
Efektivita výměn vyjadřuje v tomto případě procentuální počet nástrojů, které v daném měsíci vydržely stanovenou životnost. Po zbytek diplomové práce bude slovo efektivita používáno v tomto smyslu. Například v únoru vydrželo do konce životnosti 83,2 % použitých destiček. Naopak v prosinci vydrželo předepsanou životnost 100 % použitých nástrojů. Průměrná hodnota efektivity výměny je 94,63 %. Lze tedy říct, že průměrně v 94,63 % bylo dosaženo konce předepsané životnosti. Lze tedy zavedenou životnost označit za stabilní a dobře nastavenou hranici výměny.

#### 4.3.5 Měření geometrie bříty nové VBD

Na jedné vyměnitelné destičce bylo provedeno měření geometrie bříty. Měření bylo provedeno pomocí přístroje Alicona (viz obr. 4.4). Na obrázku 4.17 respektive 4.18 je zobrazena geometrie bříty.



Obr. 4.17 Měřená geometrie bříty destičky ze slinutého karbidu.



Obr. 4.18 Geometrie bříty destičky ze slinutého karbidu.

Podél břitu destičky bylo provedeno čtyřicet optických řezů pomocí přístroje Alicona. Výsledná geometrie byla stanovena pro jednotlivé řezy. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce, která tvoří přílohu 3 této práce.

Dále byla změřena geometrie břitu destičky. Obrázek 4.19 zobrazuje břit destičky, na kterém proběhlo dané měření pomocí měřicího přístroje Alicona. Měřicí protokol je uveden v příloze 4 této práce.





Obr. 4.19 Zobrazený břit VBD, na kterém došlo k měření.

#### 4.3.6 Vyhodnocení tvaru vzniklých třísek

Byly odebrány třísky na konci životnosti nástroje a byly nafoceny na mikroskopu KEYENCE při dvacetinásobném zvětšení. Tvar vzniklých třísek je vidět v tabulce 4.8.

Tab. 4.8 Nasnímané snímky vzniklých třísek na konci životnosti nástroje.

Nahromaděné třísky	Detailní pohled
	

Jak je vidět, tak tříska má elementární tvar, což je také cílem z důvodu snazšího odvádění třísky z místa řezu a následně dopravníkem ven z prostoru obráběcího stroje. Světlá barva třísky značí konec životnosti nástroje. Lze tak usoudit z toho, že se zvětšujícím se opotřebením řezného nástroje je teplo odváděno spíše nástrojem a obrobkem než třískou.

#### 4.4 Vyhodnocení a popis hrubovací frézy

Novým nástrojem a zároveň náhradou za nástroj T4 je hrubovací fréza. Tento nástroj hrubuje stejnou část obrobku jako nástroj T4. Jedná se o povlakovanou frézu se čtyřmi břitzy vyrobenou ze slinutého karbidu třídy M. Tvar frézy kopíruje tvar obráběné dolní části dílu. Rozdíl mezi technologiemi je ten, že fréza úsek číslo 6 nejdříve vyhrubuje a následně dokončí na jmenovitý rozměr. Obrábění se provede za jeden takt nástroje, zatímco u nástroje T4 je úsek 6 dokončen dalším nástrojem v následující operaci. Fréza se upíná tepelně do nástrojového držáku, který je upnut do stroje pomocí kužele HSK 25C. Upnutá fréza v tepelném upínači je vidět na obrázku 4.20.



Obr. 4.20 Upnutá fréza v tepelném upínači.

Tvar držáku je přizpůsobený omezenému prostoru v upínací kleštině. Za současného otáčení nástroje a obrobku dojde k hrubovacímu procesu v dolní části kusu. Plochy, které nástroj musí obrobit, jsou stejné jako na obrázku 4.9. Takto vyhrubovaná část díku je následně dokončena.

##### 4.4.1 Popis nástroje a používané řezné podmínky

Materiál řezného nástroje je povlakovaný slinutý karbid. Další informace o řezném nástroji jsou uvedeny v tabulce 4.9.

Tab. 4.9 Označení používaných fréz.

Označení	Počet břitů na nástroji	Úhel stoupání šroubovice [°]	Materiál VBD	Povlak
fréza	4	30	slinutý karbid třídy M	(Al,Ti)N

Používané řezné podmínky jsou znázorněny v tabulce 4.10. Otáčky nástroje a šířka záběru ostří jsou konstantní během celého hrubovacího procesu. Posuvová rychlost se mění při hrubování a při dokončování rozměru v úseku č. 6. Obrábění probíhá za současného otáčení hrubovací frézy a obrobku. Celková radiální obráběná vzdálenost je na každém obráběném kuse stejná. Tato vzdálenost je rozdělena na tři úseky, kde v každém úseku dochází ke změně řezných podmínek. Po obrobení posledního úseku dojde ještě k otočení kusu bez radiálního posuvu frézy, aby došlo k obrobení zbytkového materiálu vlivem odpružení nástroje.

Tab. 4.10 Řezné podmínky v dané radiální části.

Radiální úsek	Radiální vzdálenost $L_r$ [mm]	Otáčky frézy $n_f$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Otáčky obrobku $n_o$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	Posuvová rychlost $v_f$ [mm/min]	Šířka záběru ostří $a_p$ [mm]
1	0,9	7 000	400	125	12,75
2	0,1	7 000	400	125	12,75
3	0,1	7 000	400	80	12,75

#### 4.4.2 Výpočty strojních časů a počtu obdržených rázů

##### Jednotkový strojní čas

Jednotkový strojní čas při hrubování kontury byl vypočítán podle vztahu (4.1). Jednotkové časy byly počítány samostatně pro jednotlivé úseky jedna až tři. Dráha  $L$  je opět uvažována bez nájezdů a přejezdů. Tabulka 4.10 ukazuje délky radiálních úseků.

Tabulka 4.11 obsahuje vypočítané hodnoty časů pro všechny úseky obrábění. Ukázka výpočtu pro první úsek:

$$t_{ASf1} = \frac{L_{r1}}{v_{f1}} = \frac{0,9}{125} = 0,007 \text{ min} = 0,432 \text{ s}$$

Tab. 4.11 Vypočítané hodnoty strojních časů pro jednotlivé hrubovací úseky.

$t_{ASf1}$ [s]	$t_{ASf2}$ [s]	$t_{ASf3}$ [s]	$t_{AScf}$ [s]	$t_{ASf30000}$ [min]
0,432	0,048	0,075	0,555	277,5

##### Počet obdržených rázů během obráběcího procesu

I v případě frézy se jedná o přerušovaný řez. To znamená, že každý zub frézy je vystaven určitému množství rázů během hrubovacího procesu. Výpočet rázů byl proveden pro jednotlivé úseky. Počet rázů byl počítán podle vztahu 4.2.

Tabulka 4.12 obsahuje vypočítané hodnoty rázů pro všechny úseky obrábění. Otáčky jsou převedeny na odpovídající jednotky tj.  $\text{s}^{-1}$ . Ukázka výpočtu pro první úsek:

$$R_{1f} = t_{ASf1} \cdot (n_f + n_o) = 0,432 \cdot (116,67 + 6,67) = 53,3 = 53 [-]$$

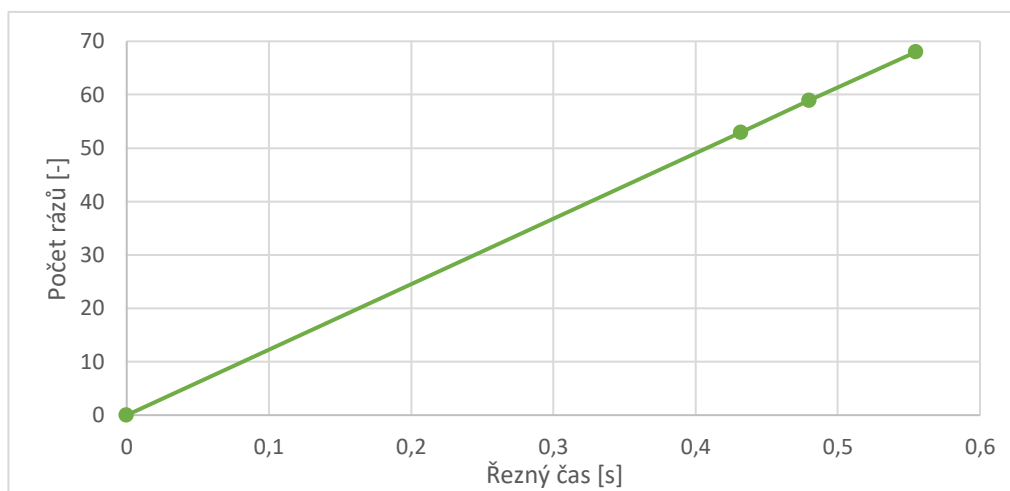
Tab. 4.12 Vypočítané hodnoty obdržených rázů pro jednotlivé hrubovací úseky.

$R_{f1}$ [-]	$R_{f2}$ [-]	$R_{f3}$ [-]	$R_{cf}$ [-]	$R_{cf30000}$ [-]
53	6	9	68	2 040 000

Jelikož počet rázů nemůže být desetinné číslo, tak jsou rázy vždy zaokrouhleny na nejbližší celé číslo. Tento fakt způsobuje to, že během obrobení jednoho úseku obdrží



každý ze zubů jiný počet rázů. Avšak při dalším záběru se rázy zase vyrovnají. Lze tedy usoudit, že se jedná o zanedbatelnou chybu ve výpočtu celkového množství rázů. To znamená, že všechny zuby frézy jsou vystaveny stejnému množství rázů. Obrázek 4.21 ukazuje grafickou závislost vzniklých rázů na řezném čase.

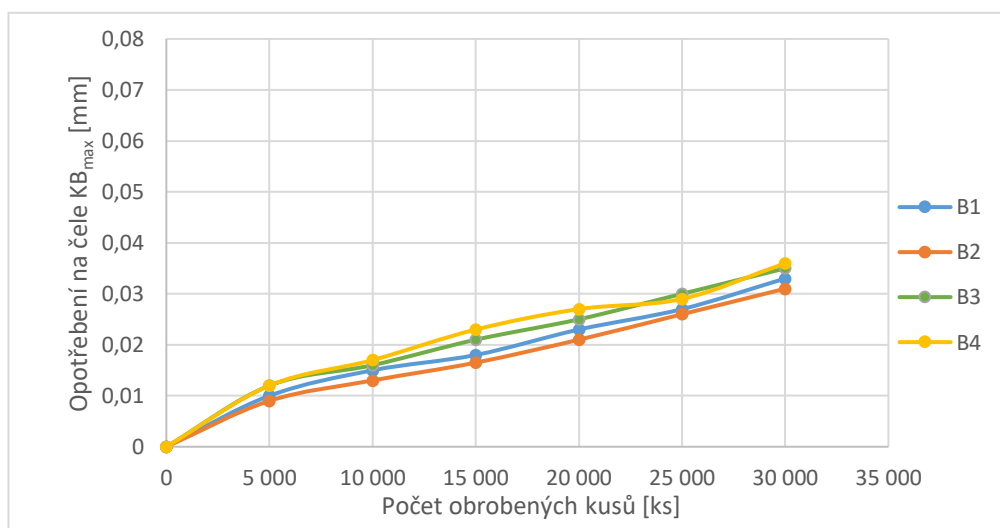


Obr. 4.21 Průběh rázů v průběhu řezného času pro jeden obrobený kus.

#### 4.4.3 Vyhodnocení vzniklého opotřebení hrubovací frézy

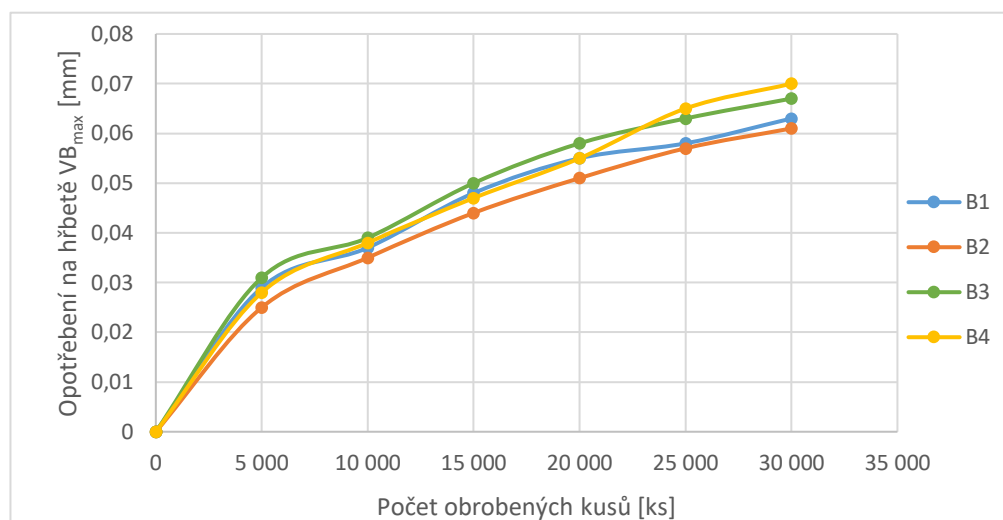
Opotřebení v průběhu životnosti nástroje na jednotlivých břitech bylo nasnímkováno na mikroskopu ZEISS 2000-C a změřeno na mikroskopu KEYENCE (viz kapitola 4.1). Měření opotřebení proběhlo tak, že v pravidelných intervalech obrobených kusů byly změřeny hodnoty opotřebení na jednotlivých zubech frézy. Opotřebení bylo měřeno jako vzdálenost dvou bodů nebo dvou přímek. Změřené hodnoty opotřebení byly zapisovány do tabulky (viz příloha 1) a dále vyneseny do grafů.

Na obrázcích 4.22 a 4.23 jsou znázorněny příslušné grafy s vynesenými hodnotami pro danou formu opotřebení. Jedná se o závislost vzniklého opotřebení na počtu obrobených kusů pro jednotlivé břity frézy. Opotřebení bylo měřeno na přední části břitu, která dokončuje průměr v úseku číslo 6 (viz obr. 4.9).



Obr. 4.22 Závislost čelního opotřebení na počtu obrobených kusů pro jednotlivé břity frézy.

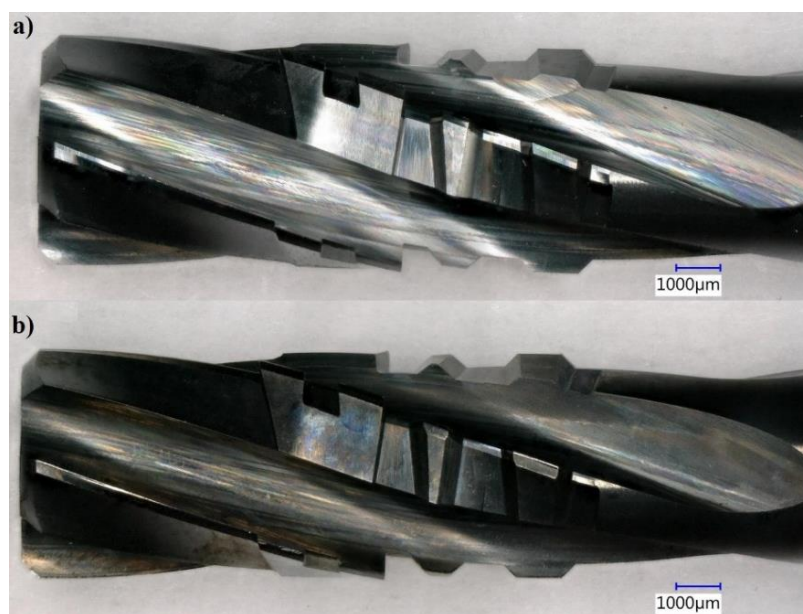




Obr. 4.23 Závislost hřbetního opotřebení na počtu obrobenných kusů pro jednotlivé břity frézy.

Jak je možné vidět na obrázku 4.22, tak čelní opotřebení má pravidelný průběh opotřebení na jednotlivých břitech. Největší opotřebení dosažené po obrobení třiceti tisíc kusů dosahuje hodnoty 0,036 mm, naopak nejnižší hodnota opotřebení je 0,031 mm. Z těchto hodnot je možné vydedukovat, že jednotlivé břity jsou rovnoměrně zatěžovány během obrábění. Ze získaného průběhu lze říct, že odpovídá teoretickému průběhu, tzn. rychlé počáteční opotřebení následované stabilně rostoucím opotřebením. Jelikož se v grafu nevyskytuje fáze zvýšené intenzity opotřebení následované koncem životnosti, tak lze usoudit, že potenciál nástroje není zcela využit.

Opotřebení na hřbetě je znázorněno na obrázku 4.23. Opět lze konstatovat, že opotřebení na jednotlivých břitech vykazuje rovnoměrné opotřebení. Největší hodnota hřbetního opotřebení je 0,070 mm a nejmenší je 0,059 mm. Hřbetní opotřebení dosahuje dvakrát většího opotřebení než v případě čelního opotřebení. Získaný průběh opět odpovídá teoretickému průběhu. Z toho vyplývá, že potenciál nástroje není zcela vyčerpán.



Obr. 4.24 Zobrazení fréz: a) nová fréza, b) opotřebovaná fréza.

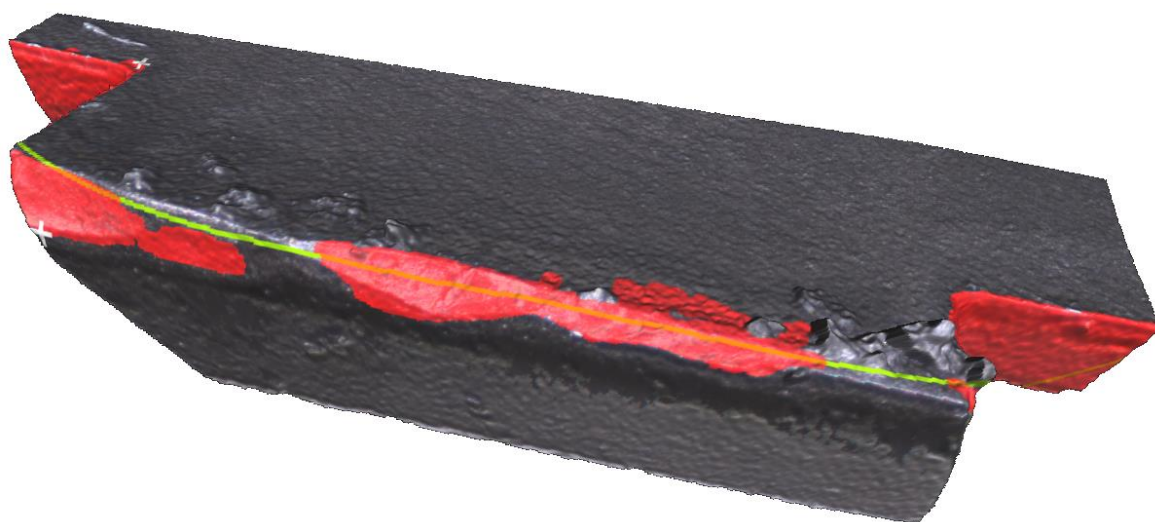
Vzniklé opotřebení na čele a hřbetě nástroje po konci životnosti bylo nasnímáno na mikroskopu KEYENCE při dvacetinásobném zvětšení. Na obrázku 4.24 je zobrazená nová a opotřeбенé frézy.

Na první pohled není znatelný rozdíl mezi novou a opotřeбенou frézou. Znatelná je změna barvy opotřeбенého nástroje, kde opotřebovaný nástroj má tmavší barvu. Tento jev lze vysvětlit tím, že daná fréza je vystavena vysokým teplotám během obrábění. To vede k ohřátí frézy na vysokou teplotu a následné změně barvy. Detailní opotřebení na čele a hřbetě nástroje je zobrazeno na obrázku 4.25.

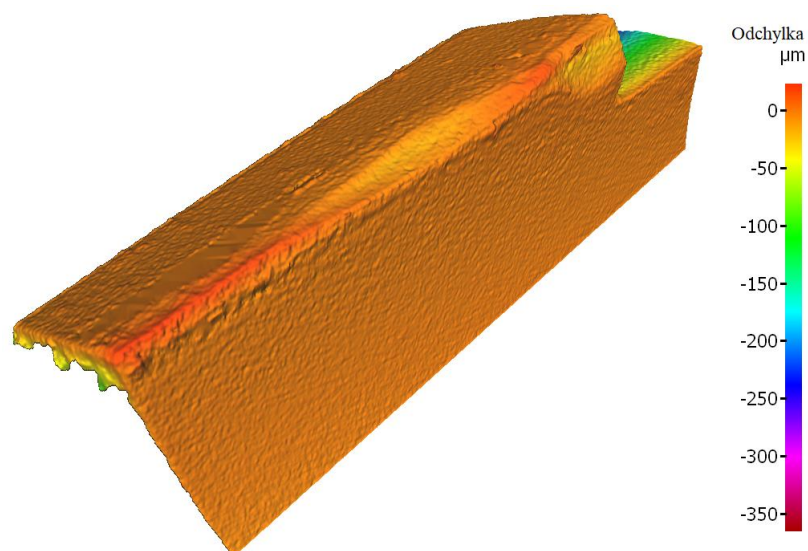


Obr. 4.25 Zobrazené opotřebení na nástroji.

Na obrázku 4.25 je už opotřebení znatelnější. Zvláště na části břitu, které provádí hrubovací operace v oblasti dvojitého zápichu. Tento jev může být vysvětlen tak, že v této oblasti jsou břity vystaveny největší radiální vzdálenosti. To znamená, že musí odebrat největší množství materiálu, a tudíž jsou nejvíce namáhány. Obrázky 4.26 a 4.27 zobrazují detailní pohled na opotřebení v tomto místě nasnímané na přístroji Alicona. Čelní i hřbetní opotřebení na části břitu, která dokončuje průměr v úseku číslo 6, vykazuje stabilní průběh po celé délce ostří. Na tomto břitu se vyskytuje opotřebení ve formě abraze.



Obr. 4.26 Nasnímané opotřebení břitu frézy v polovině času životnosti.

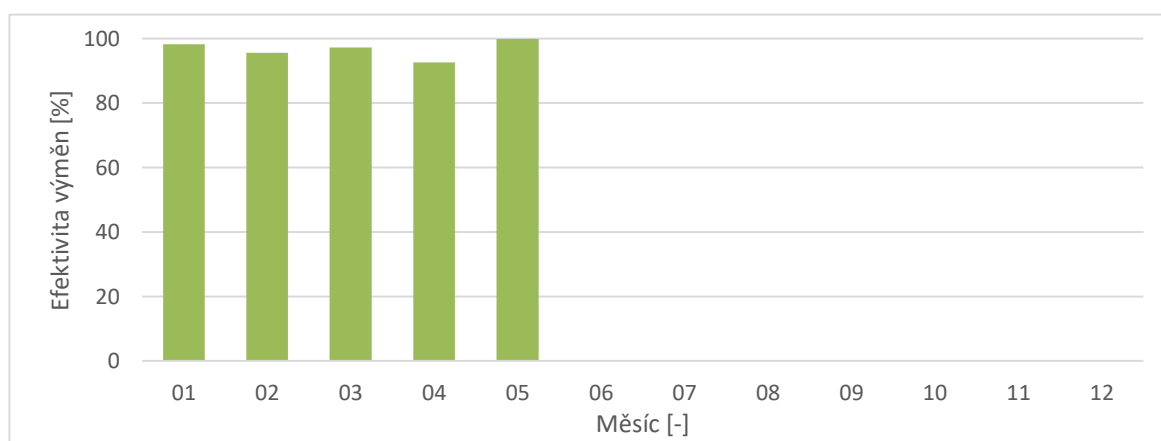


Obr. 4.27 Nasnímané opotřebení břitu frézy na konci životnosti.

Obr. 4.26 znázorňuje opotřebení frézy v polovině životnosti. Opotřebení je nejvíce znatelné na hřbetě nástroje, a to ve formě otěru. Lze konstatovat, že opotřebení není pravidelné po celé délce ostří. V pravé části břitu je dokonce znatelný nárůstek, který značí vysoké teploty obráběcího procesu doprovázené vysokými tlaky. V první řadě může nárůstek fungovat jako dočasná ochrana břitu, avšak v konečném důsledku může způsobit rychlejší opotřebení, protože společně s odtržením nárůstku dojde i k vytržení částic břitu. Na obrázku 4.27 je zobrazené opotřebení, které je opět převážně na hřbetní ploše nástroje. Jelikož je snímek pořízený z frézy, která dosáhla své životnosti lze konstatovat, že opotřebení má stabilní charakter, nikoli však po celé délce břitu, nýbrž pouze v daném místě břitu. Rozvoj opotřebení lze prohlásit za stabilní a předvídatelné, protože je ve formě otěru. Nedochází ke křehkému porušení břitu, což je důležité. V případě křehkého porušení břitu by nástroj nebyl schopen udržet kvalitu obrobeneho povrchu v úseku číslo 6. Další obrázky změřeného opotřebení a geometrie opotřebovaného břitu tvoří přílohu 5 této práce.

#### 4.4.4 Vyhodnocení efektivity výměn hrubovací frézy

Obrázek 4.28 ukazuje efektivitu výměn hrubovací frézy v jednotlivých měsících od doby její implementace.

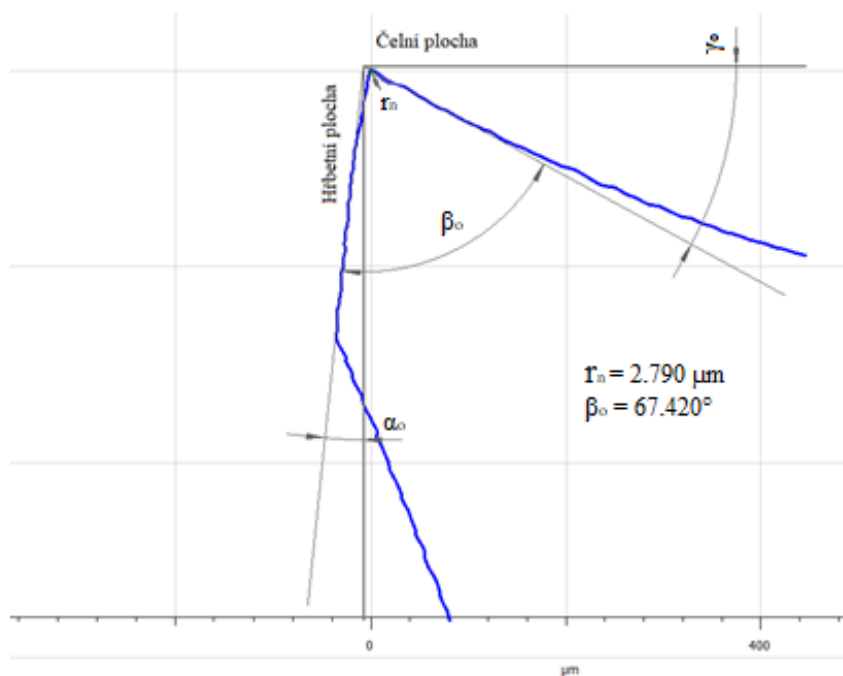


Obr. 4.28 Zobrazená efektivita výměn hrubovací frézy v jednotlivých měsících.

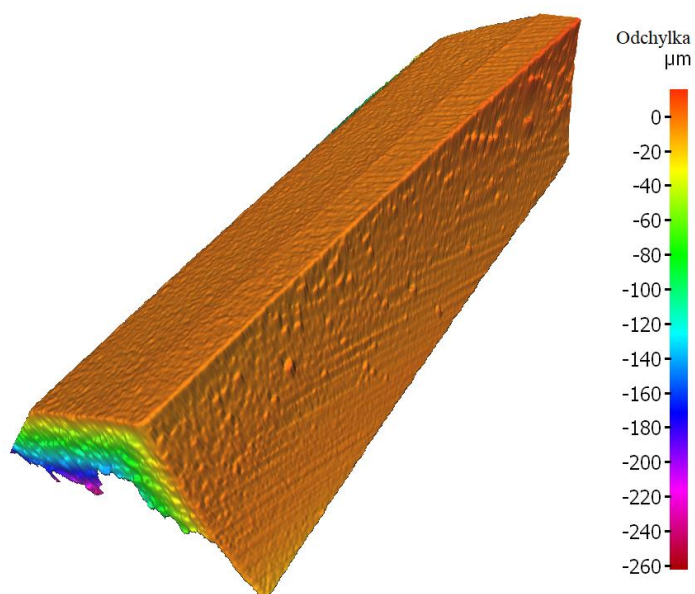
Například v únoru vydrželo do konce životnosti 83,2 % použitých fréz. Naopak v prosinci vydrželo předepsanou životnost 100 % použitých nástrojů. Průměrná hodnota efektivity výměny je 94,63 %. Lze tedy říct, že průměrně v 94,63 % bylo dosaženo konce předepsané životnosti. Lze tedy zavedenou životnost označit za stabilní a dobře nastavenou hranici výměny. Jelikož daná fréza stabilně vydrží stanovenou životnost, je možné odhadnout, že její potenciál je ještě větší.

#### 4.4.5 Měření geometrie břitu nové frézy

Stejně jako v případě destiček nástroje T4 došlo k měření geometrie břitu i u frézovacího nástroje. Obrázky 4.29 a 4.30 zobrazují geometrii břitu frézy.



Obr. 4.29 Měřená geometrie břitu frézy ze slinutého karbidu.

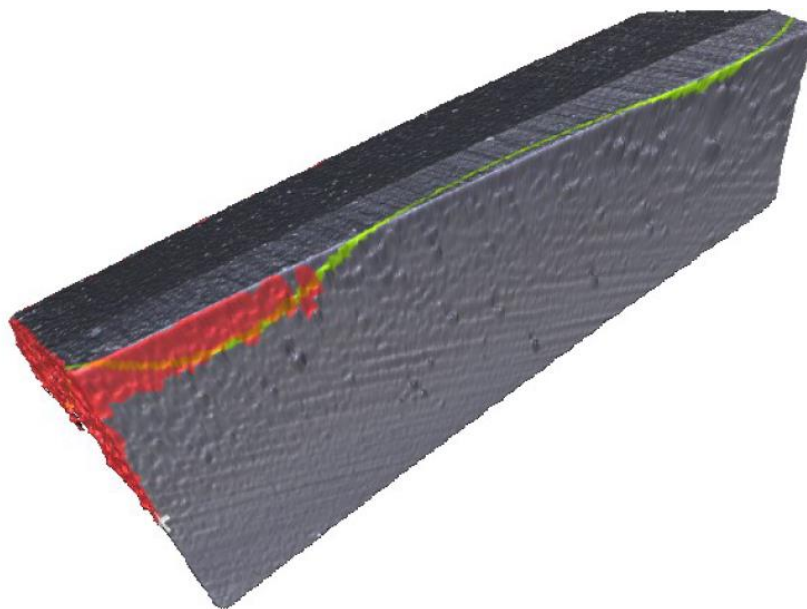


Obr. 4.30 Geometrie břitu frézy ze slinutého karbidu.



Podél břitu destičky bylo provedeno třicet tři optických řezů pomocí přístroje Alicona. Výsledná geometrie byla stanovena pro jednotlivé řezy. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce viz příloha 6.

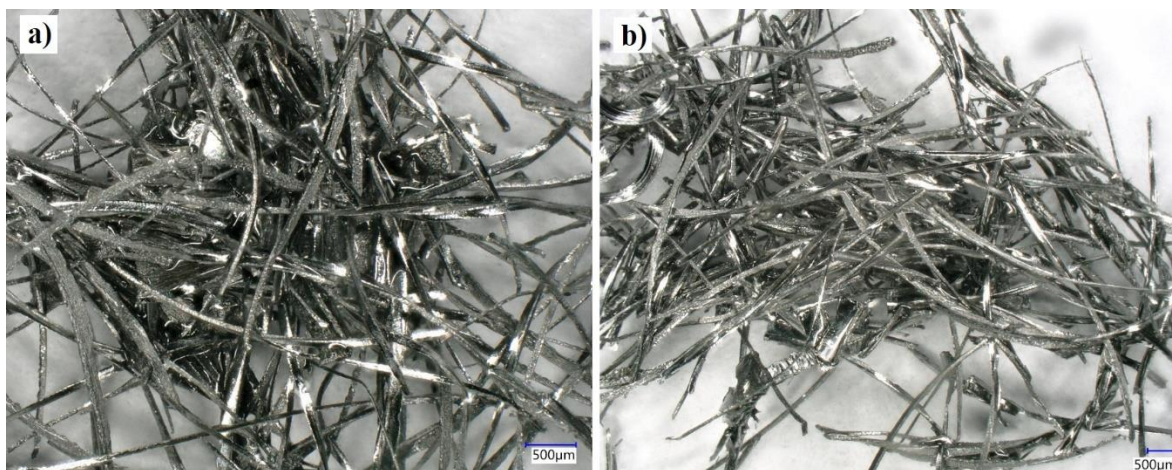
Opět byla změřena geometrie břitu. Obrázek 4.31 zobrazuje břit frézy, na kterém proběhlo dané měření pomocí měřicího přístroje Alicona. Měřicí protokol je uveden v příloze 7 této práce.



Obr. 4.31 Zobrazený břit frézy, na kterém došlo k měření.

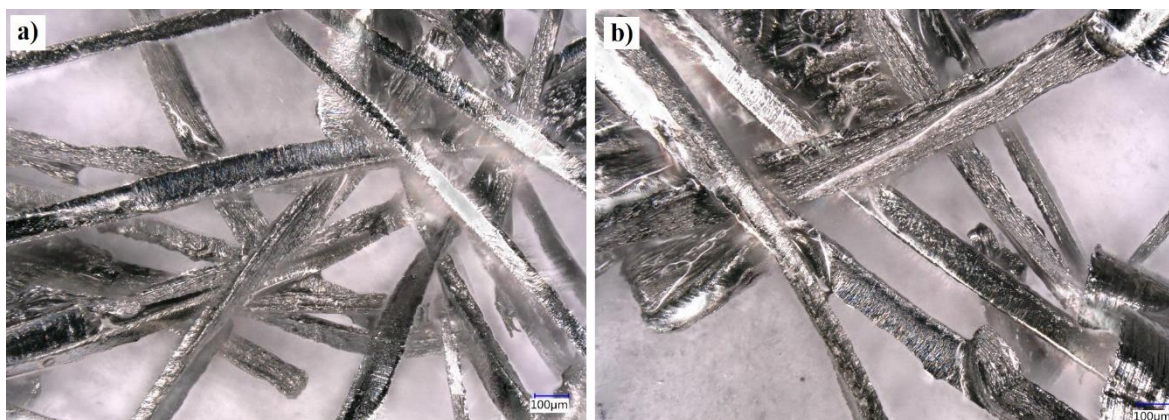
#### 4.4.6 Vyhodnocení tvaru vzniklých třísek

Byly odebrány třísky na konci a uprostřed životnosti nástroje a byly nafoceny na mikroskopu KEYENCE při dvaceti násobném zvětšení. Tvar vzniklých třísek je vidět na obrázcích 4.32 respektive 4.33.



Obr. 4.32 Vzniklé třísky: a) z poloviny životnosti, b) z konce životnosti.

Jak je vidět, tak tříska má stužkový tvar, což odpovídá frézovací operaci při velkých hodnotách šířky záběru ostří. Není znatelný rozdíl mezi barvou třísky, která vznikla v polovině životnosti a barvou třísky z konce životnosti nástroje.



4.33 Detail vzniklých třisek: a) z poloviny životnosti, b) z konce životnosti.

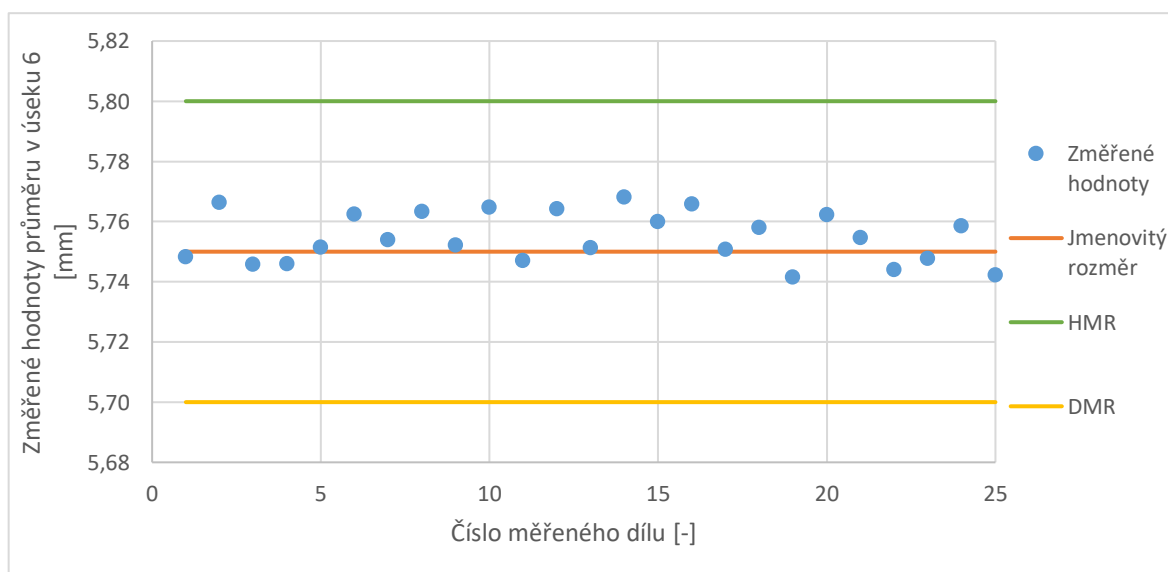
#### 4.5 Rozbor kvality a přesnosti výrobních kusů

Jak bylo popsáno v kapitole 2.2, tak způsobilost procesu hraje významnou roli při řízení procesu v sériové výrobě. Z naměřených dat byly vypočítány hodnoty ukazatelů způsobilosti  $C_p$  a  $C_{pk}$ . Celý protokol byl zpracován v programu excel, kde byly použity vzorce definované v kapitole 2.2. Kompletní protokol tvoří přílohu 8 této práce. Vypočítané hodnoty ukazatelů způsobilosti jsou uvedeny v tabulce 4.13. Zároveň jsou v tabulce také uvedeny všechny parametry potřebné pro jejich výpočet.

Tab. 4.13 Potřebné parametry pro výpočet ukazatelů způsobilosti.

Střední hodnota $\bar{x}$ [mm]	Směr. odchylka $\sigma$ [mm]	$C_{pU}$ [-]	$C_{pL}$ [-]	$C_p$ [-]	$C_{pk}$ [-]
5,7547	0,0083	1,8079	2,1863	1,9971	1,8079

Obrázek 4.32 zobrazuje statistickou interpretaci.



Obr. 4.34 Statistická interpretace dosažených výsledků.

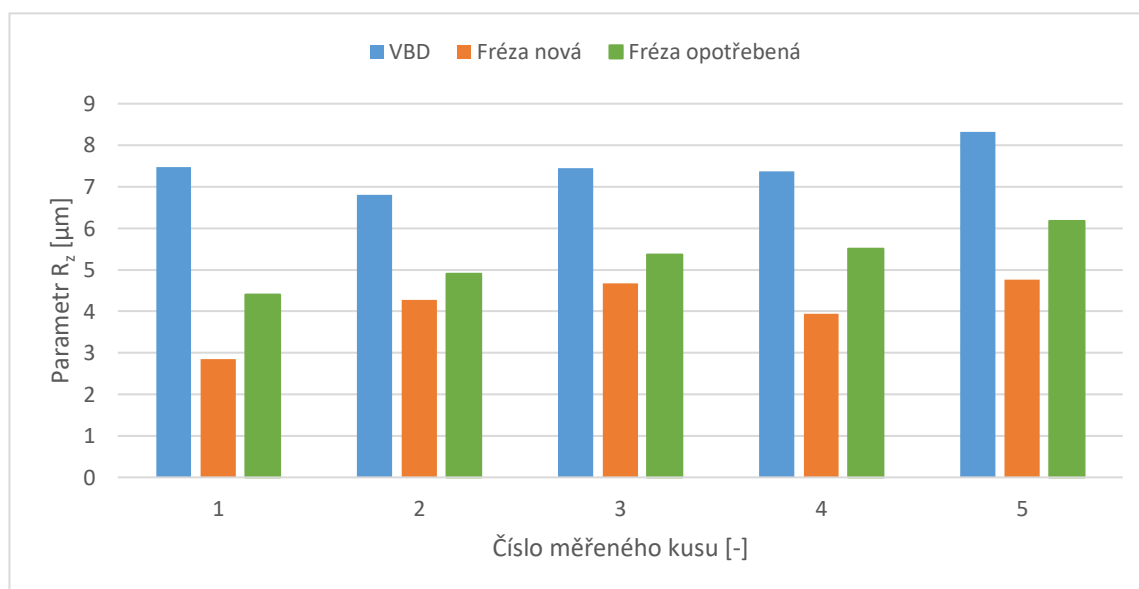
Na dvaceti pěti kusech byl změřen průměr, který je dokončen frézovací operací. Konkrétně se jedná o průměr v úseku 6 na obrázku 4.9. Jak je vidět, tak oba parametry

způsobilosti přesahují hodnotu 1,67, což je stanovená mezní hodnota, od které je možné výrobní proces považovat za způsobilý. Jelikož ukazatelé způsobilosti  $C_p$  a  $C_{pk}$  nedosahují shodných hodnot, tak proces není ideálně centrován, avšak je velmi blízko centrální hodnotě. Tento fakt vyplývá z obrázku 4.34, kde je vidět, že většina naměřených hodnot přesahuje hodnotu jmenovitého rozměru. Což je také dokázáno hodnotou parametru  $C_{pk}$ . Finálně lze však konstatovat, že výrobní proces je způsobilý.

#### 4.6 Technologicko-ekonomické vyhodnocení dosažených výsledků

##### 4.6.1 Vyhodnocení kvality obrobeného povrchu v úseku číslo 6

Jedním z možných parametrů, jak lze porovnat výše zmíněné nástroje je kvalita obrobeného povrchu. Kvalita povrchu byla měřena na konturografu T4 (viz obr. 4.2) a následně vynesena do grafů. Měření proběhlo na pěti náhodně zvolených kusech, které byly vyhrubovány pomocí nástroje T4 a v následující operaci dokončeny břitovou destičkou. Vyhodnocení proběhlo také v případě obrobení frézou. Zde bylo změřeno pět kusů na začátku a pět kusů na konci životnosti stejné frézy. Drsnost povrchu byla měřena v úseku číslo 6. Na obrázcích 4.35 a 4.36 jsou znázorněny grafy pro největší výšku profilu  $R_z$  a průměrnou aritmetickou úchylku profilu  $R_a$ .

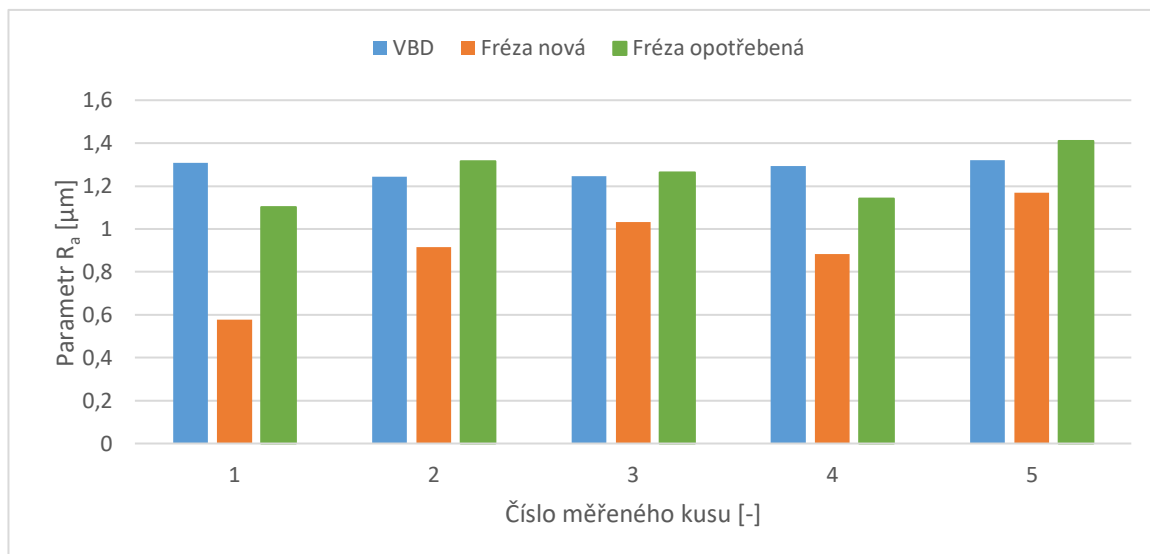


Obr. 4.35 Největší výška profilu  $R_z$ .

Z obrázku 4.35 vyplývají následující závěry. Pokud byl povrch vyhrubován nástrojem T4 a následně dokončen pomocí VBD, tak největší výška profilu  $R_z$  vykazuje větší hodnoty než v případě dokončení povrchu frézou. Na druhou stranu parametr  $R_z$  dosahuje rovnoměrných hodnot pro všechny měřené kusy. Není znatelný žádný výrazný pokles ani nárůst parametru  $R_z$ . Pokud je povrch dokončen pomocí frézovacího nástroje, tak parametr  $R_z$  dosahuje menších hodnot. Je znatelný nárůst parametru  $R_z$  na konci životnosti nástroje. Lze však konstatovat, že ve všech případech měření jsou dodrženy požadavky dané výkresovou dokumentací.

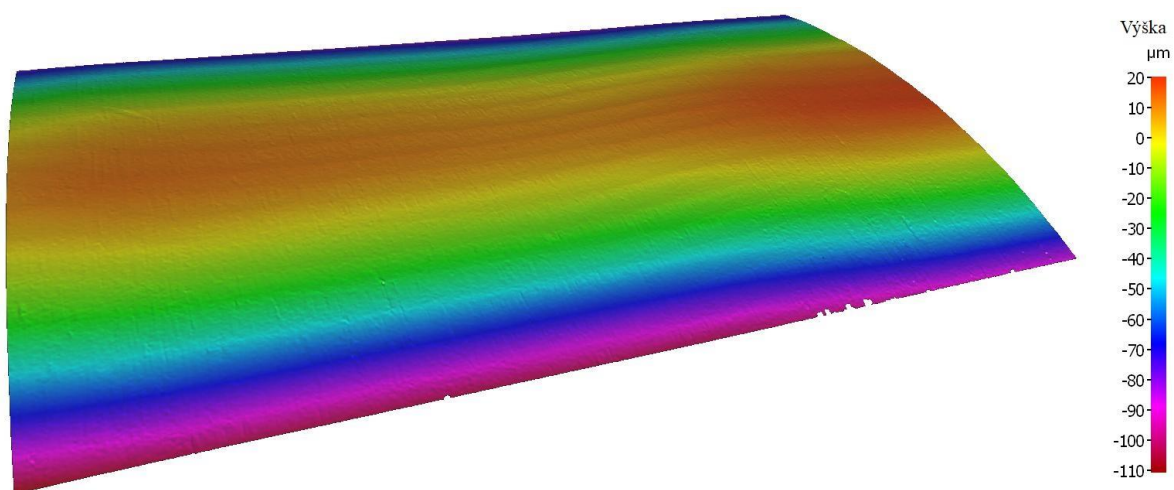
Z obrázku 4.36 je patrné, že v případě, kdy byl povrch dokončen VBD, je dosahováno stabilně parametru  $R_a$  bez větších rozdílů. Průměrná hodnota drsnosti povrchu  $R_a$  je 1,28  $\mu\text{m}$  v případě dokončení VBD. Opět je znatelný rozdíl v hodnotách parametru  $R_a$  na začátku a na konci životnosti v případě dokončení frézou. Hodnoty mohou kolísat ze

začátku životnosti nástroje, a to z důvodu nestabilního obráběcího procesu, který je způsoben zaoblováním poloměru ostří. Jakmile se nástroj stabilizuje, dochází i ke stabilizaci drsnosti povrchu. Jelikož je parametr  $R_a$  stabilní i na konci životnosti nástroje, je možné uvažovat o vyšším potenciálu nástroje.



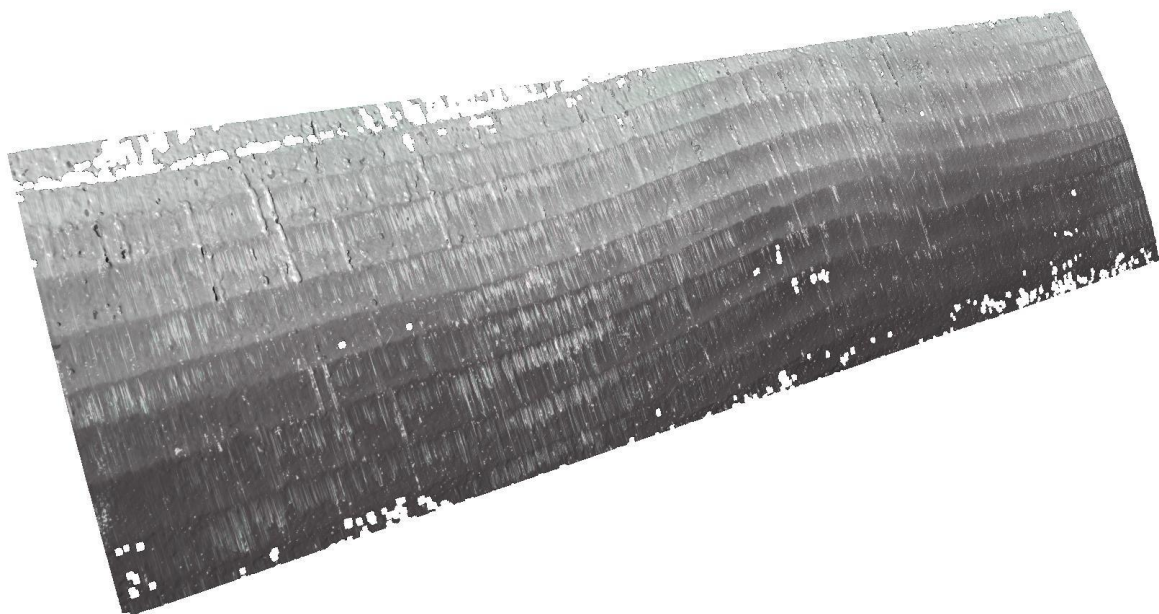
Obr. 4.36 Průměrná aritmetická úchylka  $R_a$ .

Povrch v úseku číslo 6 byl nasnímán a vyhodnocen na přístroji Alicona. Obrázek 4.37 respektive obrázek 4.38 zobrazuje vyhodnocený povrch. Měřicí protokoly tvoří přílohu 9 této práce. Struktura povrchu odpovídá faktu, že je daný kus frézován, nikoli soustružen. Lze však konstatovat, že daná kvalita povrchu vyhovuje jak z hlediska výkresové dokumentace, tak z hlediska funkčnosti daného dílu.



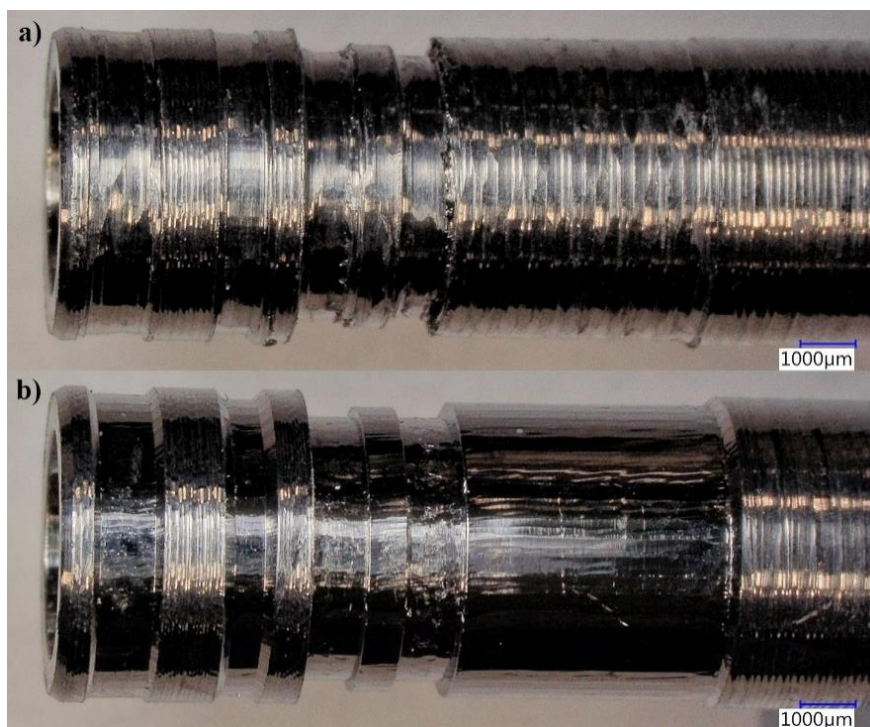
Obr. 4.37 Nasnímaný povrch součásti v úseku číslo 6.





Obr. 4.38 Detailní pohled na strukturu povrchu v úseku číslo 6.

#### 4.6.2 Vyhodnocení kvality vyhrubované části kusu



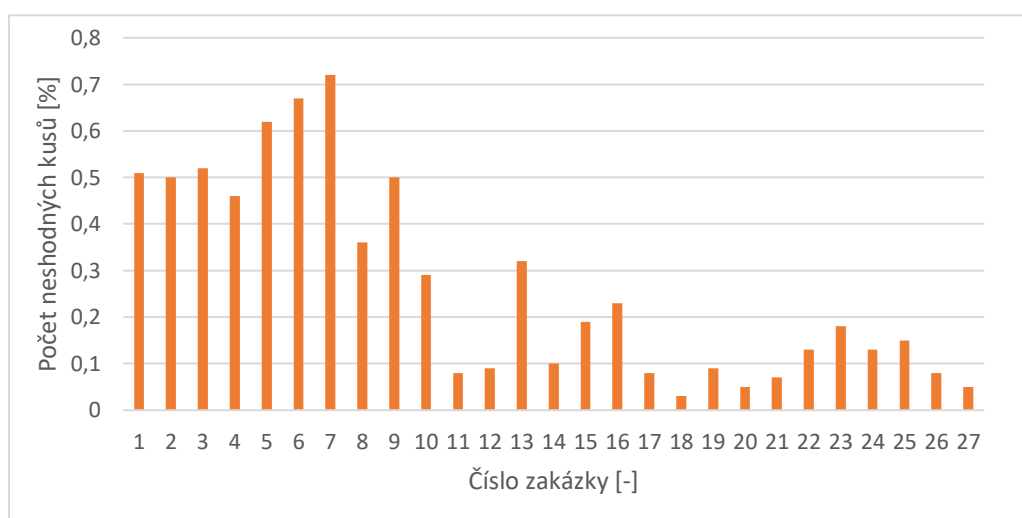
Obr. 4.39 Zobrazení vyhrubované dolní části dílu: a) nástrojem T4, b) frézou.

Na obrázku 4.39 je zobrazený rozdíl mezi součástmi vyhrubovanými pomocí nástroje T4 a hrubovací frézy. Je vidět, že na části, kterou hrubuje nástroj T4 zůstávají otřepy. Tyto otřepy jsou nejvíce patrné na přechodu dvojitého zápichu a průměru v úseku 6. Tyto otřepy mohou způsobit rychlejší opotřebení dokončovacího nástroje. Kus, který je vyhrubovaný pomocí frézy, nevykazuje žádné známky vzniklých otřepů. Vlivem toho, že fréza dokončí průměr v úseku 6, dokončovací nástroj T6 má kratší dráhu pro dokončení, což zkracuje

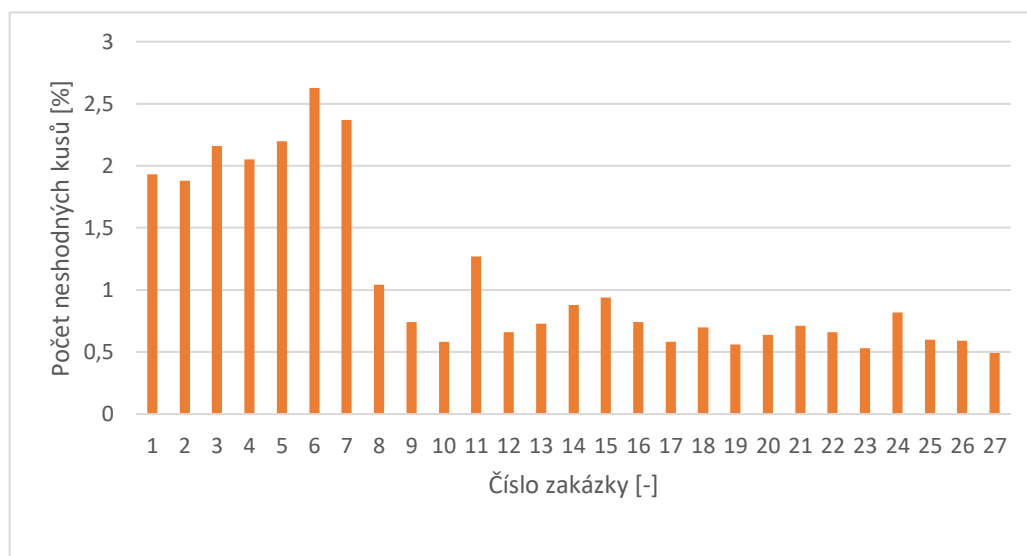
jeho výrobní takt a prodlužuje životnost. V konečném důsledku to vede k ušetření ekonomických nákladů.

#### 4.6.3 Nepřímé dopady na výrobu po implementaci hrubovací frézy

Společně se zavedením nové technologie, tj. hrubovací frézy, byla zavedena ještě jedna změna ve výrobní technologii. Obě nové technologie vedly ke zvýšení počtu vyrobených součástí za jednu směnu. Této skutečnosti bylo dosaženo zejména z toho důvodu, že díky nové technologii se tvoří mnohem vhodnější tvar třísek, které jsou snadněji odváděny z prostoru stroje. Díky tomu nevznikají nucené časové prostoje nutné k vyčištění třísek, což v konečném důsledku vede ke zvýšení počtu vyrobených kusů. Jelikož zavedení nové technologie vedlo ke snížení celkového počtu třísek v pracovní oblasti stroje, tak se také snížil počet neshodných kusů, které nesplňují požadavky na kvalitu povrchu z důvodu mechanického poškození povrchu.



Obr. 4.40 Relativní podíl počtu neshodných kusů mechanicky poškozených třískou.



Obr. 4.41 Relativní podíl počtu neshodných kusů mechanicky poškozených třískou.

Obrázek 4.40 ukazuje pokles počtu neshodných kusů. Tyto kusy jsou zařazeny mezi neshodné z důvodu mechanického poškození v dolní části kusu. Toto poškození vzniká při

vytahování kusů z kleštin. Pokud není tříska odstraněna v průběhu obrábění a zůstane zachycená na dolní části dílu, je během vytahování kus poškozen vlivem otěru o třísky. Tuto vadu se podařilo snížit vlivem lepšího utváření třísky a následně lepšího odvedení z místa řezu.

Na obrázku 4.41 je vidět klesající průběh počtu neshodných kusů. Tyto kusy jsou nevyhovující z hlediska kvality z důvodu mechanického poškození. Toto poškození je ve formě otlaku na povrchu kusu v místě průměru, za který je daný kus upínán při dokončování na stroji B. Pokud se v upínací kleštině vyskytuje tříska, tak během mechanického upnutí kusu dojde k otlaku třísky do povrchu dílu, čímž se kus stává neshodným. Tuto vadu se podařilo částečně odstranit vlivem lepšího utváření třísky, díky kterému jsou třísky snadněji odvedeny z prostoru obráběcího stroje a nezůstávají zaseknuté v upínacích kleštinách.

#### 4.6.4 Ekonomické zhodnocení obou nástrojů

V této kapitole bude proveden výpočet ekonomické úspory peněz. Byly vypočítány náklady na jeden obrobený kus pro každý nástroj a následně se spočítala úspora peněz za celý rok pro daný počet vyrobených kusů ročně.

Náklady na jeden obrobený kus pro nástroj T4. Výpočet se provedl podle vztahu 4.3.

$$N_{ok} = \frac{N_n}{Z_n} \quad (4.3)$$

$$N_{ok1} = \frac{N_{T4}}{Z_{T4}} = \frac{2948}{8000} = 0,3685 \text{ Kč/ks}$$

Náklady na obrobený kus při obrobení frézou byly spočítány opět podle vztahu 4.3.

$$N_{ok2} = \frac{N_F}{Z_F} = \frac{2900}{30000} = 0,0967 \text{ Kč/ks}$$

Úspora na jeden obrobený kus se vypočítá podle vztahu 4.4.

$$U_K = N_{ok1} - N_{ok2} \quad (4.4)$$

$$U_K = N_{ok1} - N_{ok2} = 0,3685 - 0,0967 = 0,2718 \text{ Kč/ks}$$

Při celkové roční výrobě deseti milionů kusů bude celková roční úspora vypočítána podle vztahu 4.5.

$$U_R = P_{vk} \cdot U_K \quad (4.5)$$

$$U_R = P_{vk} \cdot U_K = 10000000 \cdot 0,2718 = 2\,718\,000 \text{ Kč/rok}$$

Při zavedení frézovacího nástroje došlo k úspoře 2 718 000 Kč za rok.

#### 4.7 Optimalizace řezných podmínek

Po implementaci frézovacího nástroje došlo ke zlepšení výrobního procesu (viz předchozí kapitoly). Pro získání optimálních řezných podmínek byly provedeny experimenty, ze kterých byly dané podmínky získány. Optimalizace proběhla za účelem získání minimální

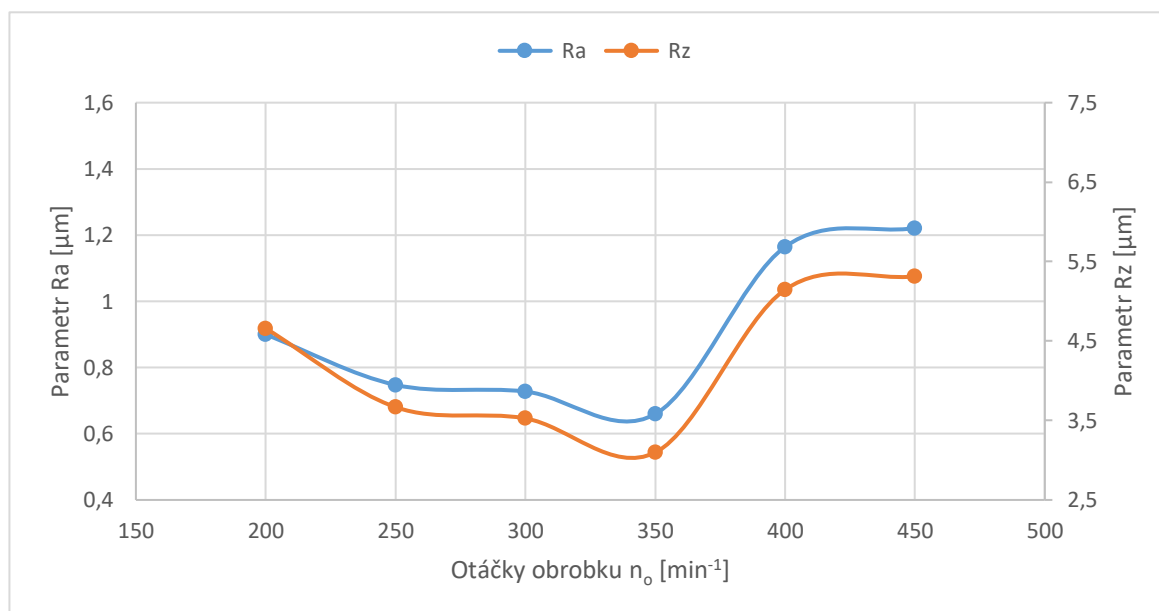
drsnosti povrchu. V úvahu byly vzaty parametry nejvyšší výšky profilu  $R_z$  a průměrné aritmetické úchylnky  $R_a$ .

První experiment byl proveden za účelem zisku závislostí řezných podmínek na parametrech drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$ . Řezné podmínky, které byly brány v úvahu, jsou otáčky obrobku  $n_o$ , otáčky frézy  $n_f$  a posuvová rychlost frézy  $v_f$ . Experiment probíhal tak, že jedna veličina z řezných podmínek se považovala za proměnnou, zatímco zbylé řezné podmínky byly během obrábění konstantní. Pro jednotlivé hodnoty řezných parametrů došlo k vyhodnocení parametrů drsnosti povrchu. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro jednotlivé řezné podmínky jsou zobrazeny v tabulkách 4.14 až 4.16. Dále byly naměřené hodnoty vyneseny do grafů, které jsou vidět na obrázcích 4.42 až 4.44.

Tab. 4.14 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro  $n_o$  = proměnná a  $n_f$ ,  $v_f$ ,  $a_p$  = konstanta (konst).

$n_o$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	200	250	300	350	400	450
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,900	0,748	0,728	0,660	1,165	1,221
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,659	3,668	3,527	3,098	5,147	5,313

Obrázek 4.42 zobrazuje závislost parametrů drsnosti povrchu na otáčkách obrobku. Průběh ukazuje, že parametry drsnosti povrchu nejdříve pozvolna klesají se zvyšujícími se otáčkami obrobku a následně narůstají.

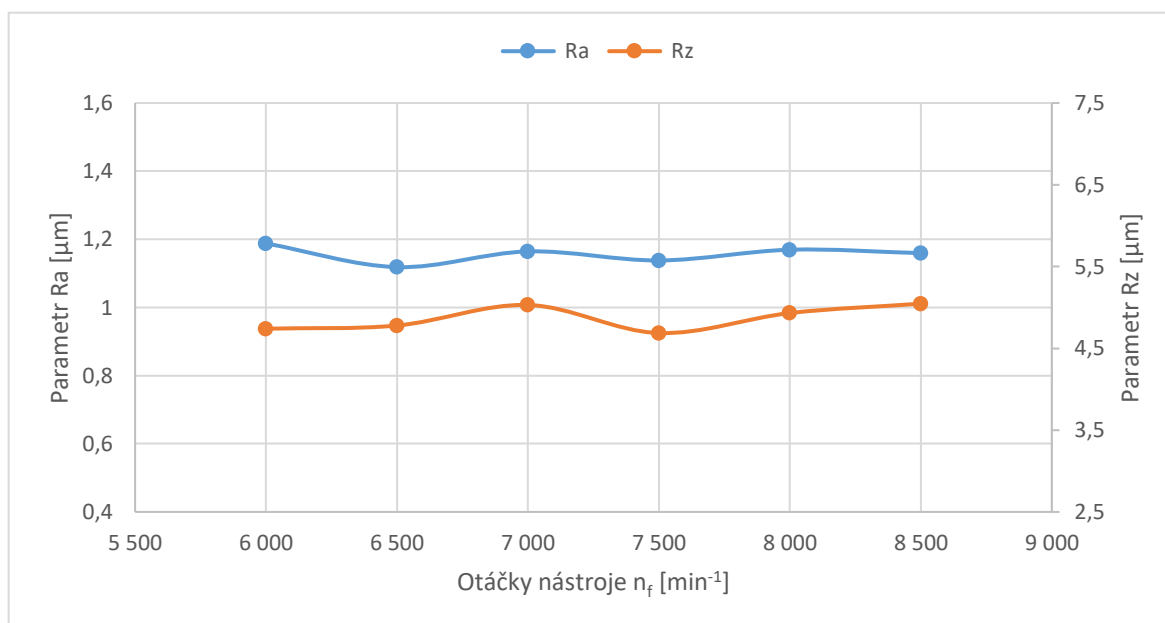


Obr. 4.42 Závislost parametrů drsnosti povrchu na otáčkách obrobku  $n_o$ ,  $n_f = 7\,000\text{ min}^{-1}$ ,  $v_f = 80\text{ mm/min}$  a  $a_p = 12,75\text{ mm}$ .

Tab. 4.15 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro  $n_f$  = proměnná a  $n_o$ ,  $v_f$ ,  $a_p$  = konst.

$n_f$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	6000	6500	7000	7500	8000	8500
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,188	1,119	1,165	1,138	1,170	1,160
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,741	4,780	5,031	4,688	4,932	5,047

Obrázek 4.43 zobrazuje závislost parametrů drsnosti povrchu na otáčkách nástroje. Vzniklý průběh ukazuje, že s rostoucími otáčkami nedochází k výraznější změně parametrů drsnosti.

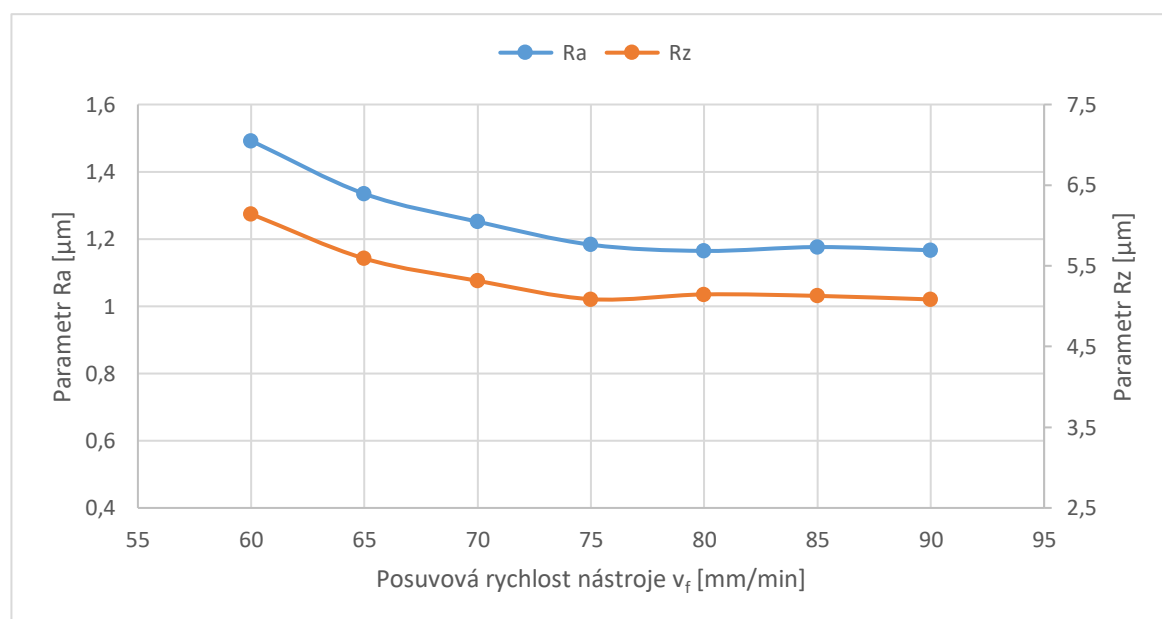


Obr. 4.43 Závislost parametrů drsnosti povrchu na otáčkách nástroje  $n_f$ ,  $n_o = 400 \text{ min}^{-1}$ ,  $v_f = 80 \text{ mm/min}$  a  $a_p = 12,75 \text{ mm}$ .

Tab. 4.16 Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro  $v_f = \text{proměnná}$  a  $n_o, n_f, a_p = \text{konst.}$

$v_f$ [mm/min]	60	65	70	75	80	85	90
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,492	1,335	1,252	1,183	1,165	1,176	1,167
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,143	5,591	5,315	5,088	5,147	5,128	5,084

Obrázek 4.44 zobrazuje závislost parametrů drsnosti povrchu na posuvové rychlosti nástroje. Zobrazený průběh ukazuje postupný pokles parametrů drsnosti povrchu s rostoucí hodnotou posuvové rychlosti nástroje.



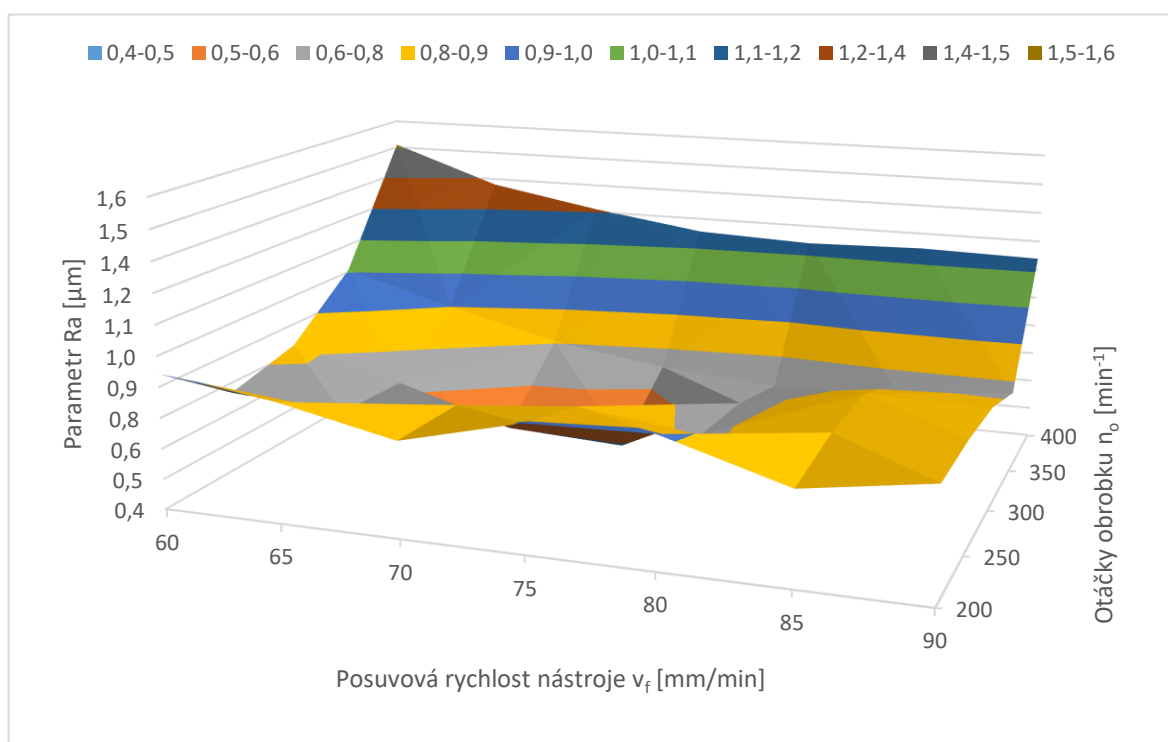
Obr. 4.44 Závislost parametrů drsnosti povrchu na posuvové rychlosti nástroje  $v_f$ ,  $n_o = 400 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_f = 7000 \text{ min}^{-1}$  a  $a_p = 12,75 \text{ mm}$ .

Ze vzniklých závislostí na obrázcích 4.42 až 4.44 je vidět, že nejmenší vliv na změnu parametrů drsnosti povrchu mají otáčky nástroje. Naopak největší vliv mají otáčky obrobku. Vzhledem k této skutečnosti byl proveden druhý experiment. Tento experiment probíhal tak, že otáčky obrobku  $n_o$  a posuvová rychlost frézy  $v_f$  byly stanoveny jako proměnné, zatímco otáčky frézy  $n_f$  byly po celou dobu konstantní. Pro jednotlivé řezné podmínky byly změřeny parametry drsnosti povrchu  $R_a$  a  $R_z$ . Naměřené hodnoty drsnosti povrchu pro jednotlivé řezné podmínky byly zapsány do tabulek 4.17 a 4.18. Následně byly naměřené hodnoty vyneseny do grafů, které jsou vidět na obrázcích 4.45 až 4.46.

Tab. 4.17 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu  $R_a$  pro  $v_f$ ,  $n_o$  = proměnná a  $n_f$ ,  $a_p$  = konst.

Parametr $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]		otáčky obrobku $n_o$ [ $\text{min}^{-1}$ ]				
		400	350	300	250	200
posuvová rychlost frézy $v_f$ [ $\text{mm/min}$ ]	60	1,492	1,010	0,790	0,720	0,932
	65	1,335	0,882	0,671	0,688	0,871
	70	1,252	0,767	0,526	0,765	0,773
	75	1,183	0,697	0,502	0,808	0,889
	80	1,165	0,660	0,728	0,748	0,900
	85	1,176	0,711	0,812	0,807	0,760
	90	1,167	0,724	0,806	0,831	0,833

Obrázek 4.45 zobrazuje závislost parametru drsnosti povrchu  $R_a$  na posuvové rychlosti nástroje a otáčkách obrobku.



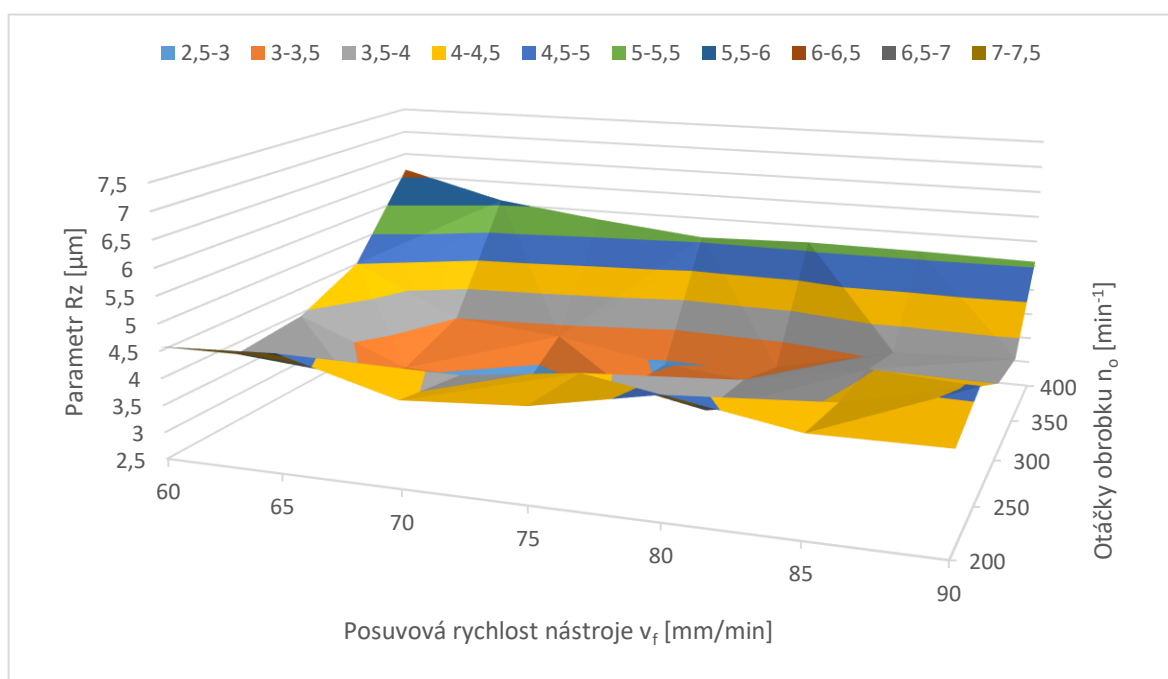
Obr. 4.45 Závislost parametru drsnosti povrchu  $R_a$  na posuvové rychlosti nástroje  $v_f$  a otáčkách obrobku  $n_o$ ,  $n_f = 7\,000\, \text{min}^{-1}$  a  $a_p = 12,75\, \text{mm}$ .

Zobrazená závislost na obrázku 4.45 ukazuje, že minimálního parametru drsnosti povrchu  $R_a$  je dosaženo, pokud jsou otáčky obrobku  $300 \text{ min}^{-1}$  a rychlost posuvu frézy je  $75 \text{ mm/min}$ .

Tab. 4.18 Naměřené hodnoty parametru drsnosti povrchu  $R_z$  pro  $v_f$ ,  $n_o$  = proměnná a  $n_f$ ,  $a_p$  = konst.

Parametr $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]		otáčky obrobku $n_o$ [ $\text{min}^{-1}$ ]				
		400	350	300	250	200
posuvová rychlost frézy $v_f$ [ $\text{mm/min}$ ]	60	6,143	4,511	3,938	3,794	4,580
	65	5,591	3,506	3,081	3,618	4,677
	70	5,315	3,319	2,605	3,837	4,080
	75	5,088	2,939	3,110	4,112	4,224
	80	5,147	3,098	3,527	3,668	4,659
	85	5,128	3,632	3,965	4,056	4,278
	90	5,084	3,721	3,931	4,573	4,293

Obrázek 4.46 zobrazuje závislost parametru drsnosti povrchu  $R_z$  na posuvové rychlosti nástroje a otáčkách obrobku.



Obr. 4.45 Závislost parametru drsnosti povrchu  $R_z$  na posuvové rychlosti nástroje  $v_f$  a otáčkách obrobku  $n_o$ ,  $n_f = 7\,000 \text{ min}^{-1}$  a  $a_p = 12,75 \text{ mm}$ .

Zobrazená závislost na obrázku 4.45 ukazuje, že minimálního parametru drsnosti povrchu  $R_z$  je dosaženo, pokud jsou otáčky obrobku  $300 \text{ min}^{-1}$  a rychlost posuvu frézy je  $70 \text{ mm/min}$ .

Lze konstatovat, že byly nalezeny optimální řezné podmínky tak, aby bylo dosaženo minimálních hodnot parametrů drsnosti povrchu. V úvahu byly vzaty omezující podmínky výkonu motoru, minimální a maximální otáčky a posuvy dané vhodným utvářením třísky.



## 5 DISKUZE

Pro názornější porovnání dosažených výsledků byla vytvořena tabulka 5.1, ve které jsou shrnuty dosažené výsledky.

Tab. 5.1 Shrnutí dosažených výsledků pro nástroj T4 a hrubovací frézu.

	Nástroj T4	Hrubovací fréza
Povlak	TiN	(Al,Ti)N
Životnost [ks]	8 000	30 000
Čas taktu [s]	6,15	5,82
Cena [Kč]	2 948	2 900
Celkový čas nástroje v řezu [min]	366,6	277,5
Počet obdržených rázů [–]	1 864 000	2 040 000
Max. opotřebení na čele [mm]	0,366	0,036
Max. opotřebení na hřbetě [mm]	0,269	0,070
Průměrná efektivita výměn [%]	94,6	96,7
Tvar vzniklých třísek	elementární	stužkový
Největší výška profilu $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	7,48	5,27
Průměrná aritmetická úchylka profilu $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,28	1,24

V tabulce 5.1 je znázorněn přehled porovnávaných veličin pro dva odlišné nástroje. Je znatelné, že frézovací nástroj vychází ve většině případů lépe. Co se týče počtu obdržených rázů, tak bříty frézy jsou vystaveny většímu počtu rázů než v případě nástroje T4, avšak opotřebení na čele i hřbetě dosahuje menších hodnot.

Cena obou nástrojů je téměř stejná, avšak rozdíl nastane při pohledu na životnost nástrojů. Zatímco u nástroje T4 je životnost nástroje 8 000 ks, tak v případě frézy je to 30 000 ks což vede ke 275% zlepšení. Dále se vlivem zavedení frézy povedlo snížit čas taktu o 0,33 s, což vede opět k potenciální úspoře výrobních nákladů.

Frézovací nástroj vydrží v řezu 277,5 minut, zatímco nástroj T4 vydrží 366,6 minut. Vzhledem k tomuto faktu a také kvůli velikosti opotřebení by bylo možné zkusit, zda by hrubovací fréza nevydržela v řezu delší čas a tím pádem by obrobila více kusů. Dalším aspektem, který podporuje tuhle domněnku je fakt, že fréza dosahuje své životnosti v 96,7 %. Tato skutečnost znamená, že frézovací proces je stabilní a nedochází k nepředvídatelným a neočekávaným změnám.

V rešeršní části této práce je popsán proces optimalizace, jakožto matematická disciplína, která hledá extrém na funkci. Bohužel nebylo možné použít žádnou z metod optimalizace popsanou v první kapitole, z důvodu toho, že dané optimalizační metody vyžadují časovou náročnost na měření, což z hlediska časových prostojů výrobní linky není možné připustit. Proto se optimalizace takovéto výroby realizuje pomocí experimentů. Po provedeném experimentu dojde k jeho vyhodnocení a vyvození závěrů.

### 5.1 Návrhy na pokračování řešení

Jedním z možných způsobů, jakým by bylo možné dále optimalizovat výrobní proces, je zkusit, jestli by se životnost používané frézy nedala navýšit. Jak už bylo zmíněno výše, tak v případě čelního i hřbetního opotřebení je možné, že potenciál nástroje není

zcela využít. Tomuto nasvědčuje i vyhodnocená efektivita výměn nástroje i kvalita obrobeného povrchu. Bylo by možné provést experiment, ve kterém by životnost frézy byla navýšena na 40 000 ks a následně vyhodnotit výsledek, zda je daná fréza spolehlivá pro tuto životnost.

Další možností je vyrobení hrubovací frézy u jiných výrobců. Jiní dodavatelé nabídnou různé ceny, povlaky a trochu odlišnou geometrii nástroje. Po provedení testů by bylo vyhodnoceno, zda je některý nástroj vhodnější než současně používaný. Porovnání by bylo provedeno na základě ceny nástroje, dodržení stanovené životnosti a stability frézy v obráběcím procesu.

Současná fréza je upínána do tepelného upínače. Tepelný upínač má ztenčený upínací průměr pro nástroj, aby bylo možné se s ním dostat do prostoru upínací kleštiny. Z toho lze předpokládat, že tepelný upínač nebude mít takovou životnost, jako ten, který má větší tloušťku stěny na upínacím průměru. Dalším faktem je to, že výměna nástroje trvá dlouhou dobu z důvodu nutného ochlazení nástrojového držáku před používáním. S výměnou nástroje je spojen problém se správným ustavením frézy v držáku. Nástrojový držák je zahříván a v průběhu toho je nutné zastrčit frézu do upínacího držáku až na doraz. Jelikož je stroj obsluhován operátory, kteří se mění v každé směně, tak je možné, že dojde k nesprávnému upnutí frézy.

Tyto výše zmíněné problémy by bylo možné eliminovat, pokud by fréza nebyla upínána za válcovou stoku do tepelného upínače, ale jako vyměnitelná frézovací korunka mechanicky upnuta do držáku s vnitřním závitem. Je nutné dodat, že tepelné upínání patří k nejpřesnějšímu možnému způsobu. Jelikož se jedná pouze o částečnou dokončovací operaci a převážně hrubovací operaci, tak je lehká nepřesnost v upínání tolerovatelná.

Do budoucna je možné říct, že podobným způsobem budou optimalizovány všechny používané výrobní nástroje. Optimalizace bude provedena na účelem snížení nástrojových nákladů na výrobu nebo pro zlepšení stability obráběcího procesu či zlepšení kvality obrobeného povrchu.

## ZÁVĚR

Pro nalezení slabého místa ve výrobním procesu byla použita podrobná analýza, která toto místo pomohla nalézt. Optimalizace proběhla v podobě implementace nové frézy. Pro danou frézu byly nalezeny optimální řezné podmínky tak, aby byla dosažena minimální drsnost obrobeného povrchu.

Shrnutí dosažených výsledků pro nástroj T4:

- použitým nástrojem byly povlakované VBD ze slinutého karbidu, které byly vystaveny 1 864 000 rázů během své životnosti,
- opotřebení vykazovalo nepravidelný charakter, a to jak na čele, tak na hřbetě,
- opotřebení bylo dosaženo po celkových 366,6 minutách v řezu,
- za předpokladu, že bude životnost nástroje nastavena na 8 000 ks, tak nástroj vydrží svou životnost průměrně v 94,6 %,
- kvalita obrobeného povrchu dosahuje průměrných hodnot 7,48  $\mu\text{m}$  v případě parametru  $R_z$  a průměrně hodnot 1,28  $\mu\text{m}$  v případě parametru  $R_a$ .

Shrnutí dosažených výsledků pro hrubovací frézu:

- použitým nástrojem byly povlakované frézy ze slinutého karbidu, které dosáhly konce své životnosti po obdržení 2 040 000 rázů,
- opotřebení vykazovalo pravidelný charakter, a to jak na čele, tak na hřbetě, dále průběh opotřebení potvrzuje teoretický charakter,
- konec životnosti nástroje nastal po 277,5 minutách v řezu,
- průměrně v 96,7 % případů dosáhne hrubovací fréza své životnosti za předpokladu, že obrobí 30 000 ks,
- ukazatelé způsobilosti dosahují hodnot způsobilého výrobního procesu,
- průměrně obrobený povrch dosahuje hodnot 5,27  $\mu\text{m}$  v případě parametru  $R_z$  a průměrně hodnot 1,24  $\mu\text{m}$  v případě parametru  $R_a$ ,
- byly nalezeny optimální řezné podmínky tak, aby drsnost povrchu dosahovala své minimální hodnoty.

Vzájemné porovnání obou nástrojů:

- opotřebení na fréze vykazuje menší hodnoty, i když je fréza vystavena většímu množství rázů,
- z ekonomického hlediska je výhodnější použít hrubovací frézu z důvodu vyšší životnosti a nižší ceny,
- optimalizace výrobního procesu vedla k úspoře výrobních nákladů, zrychlení taktu, stabilnějšímu průběhu opotřebení a snížení parametru  $R_z$ .

Z dosažených výsledků vyplývá, že se podařilo daný proces optimalizovat. V sériové výrobě vede každá optimalizace k velkým úsporám výrobních nákladů. Nahrazením hrubovacího nástroje T4 došlo k roční úspoře peněz, která je 2 718 000 Kč za rok.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] CUS, Franci a Uros ZUPERL. Approach to optimization of cutting conditions by using artificial neural networks. *Journal of materials processing technology* [online]. Elsevier B.V, 2006, **173**(3), 281-290 [cit. 2021-01-26]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.04.123
- [2] LAKSHMIKANTHAN, P. a B. PRABU. Optimization of CNC turning operations with multiple performance characteristics using taguchi based grey relational analysis. *International Journal of Vehicle Structures and Systems* [online]. MechAero Found. for Techn. Res. and Educ. Excellence, 2017, **9**(4), 228-232 [cit. 2021-01-26]. ISSN 09753060. Dostupné z: doi:10.4273/ijvss.9.4.06
- [3] CAMPOSECO-NEGRETE, Carmita a Carmita CAMPOSECO-NEGRETE. Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2013, **53**, 195-203 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S095965261300187X?via%3Dihub>
- [4] RAMU, I., P. SRINIVAS a K. VEKATESH. Taguchi based grey relational analysis for optimization of machining parameters of CNC turning steel 316. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. Institute of Physics Publishing, 2018, [cit. 2021-01-26]. ISSN 17578981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/377/1/012078
- [5] HANAFI, Issam, Abdellatif KHAMLIHI, Francisco CABRERA, Emiliano ALMANSA a Abdallah JABBOURI. Optimization of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier Ltd, 2012, **33**, 1-9 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2012.05.005
- [6] BHARATHI RAJA, S. a N. BASKAR. Particle swarm optimization technique for determining optimal machining parameters of different work piece materials in turning operation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer-Verlag, 2011, **54**(5), 445-463 [cit. 2021-01-26]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-010-2958-y
- [7] MARKO, Hrelja, Klancnik SIMON, Irgolic TOMAZ, Paulic MATEJ, Balic JOZE a Brezocnik MIRAN. Turning Parameters Optimization Using Particle Swarm Optimization. In: *Procedia engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2014, , s. 670-677 [cit. 2021-01-27]. ISSN 1877-7058. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1877705814002872>
- [8] LA FÉ-PERDOMO, I., R. QUIZA-SARDIÑAS a M. RIVAS-SANTANA. Multi-passes turning optimization for sustainable productions by using genetic algorithm and particle swarm heuristics. *DYNA (Colombia)* [online]. Universidad Nacional de Colombia, 2018, **85**(204), 59-64 [cit. 2021-01-26]. ISSN 00127353. Dostupné z: doi:10.15446/dyna.v85n204.68623
- [9] WIDHIARSO, Wahyu a Cucuk ROSYIDI. Multi objective optimization model for minimizing production cost and environmental impact in CNC turning process. In: *AIP Conference Proceedings* [online]. AIP Publishing LLC, 2018, [cit. 2021-01-27].

- ISBN 978-0-7354-1623-9. ISSN 0094-243X. Dostupné z:  
<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.5024083>
- [10] BAGABER, Salem a Ahmed YUSOFF. Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **157**(), 30-46 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0959-6526. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0959652617306753>
- [11] ZHANG, Lei, Beikun ZHANG, Hong BAO a Haihong HUANG. Optimization of Cutting Parameters for Minimizing Environmental Impact: Considering Energy Efficiency, Noise Emission and Economic Dimension. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. Seoul: Korean Society for Precision Engineering, 2018, **19**(4), 613-624 [cit. 2021-01-27]. ISSN 2234-7593. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-018-0074-3>
- [12] CAMPOSECO-NEGRETE, Carmita. Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier B.V, 2015, **91**, 109 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0959652614013067?via%3Dihub>
- [13] VELCHEV, Stefan, Ivan KOLEV, Krasimir IVANOV a Simeon GECHEVSKI. Empirical models for specific energy consumption and optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier Ltd, 2014, **80**, 139-149 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0959652614005903>
- [14] BHUSHAN, Rajesh. Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC particle composites. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier Ltd, 2013, **39**, 242-254 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0959-6526. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0959652612004155>
- [15] BHUSHAN, Rajesh. Impact of nose radius and machining parameters on surface roughness, tool wear and tool life during turning of AA7075/SiC composites for green manufacturing. *Mechanics of Advanced Materials and Modern Processes* [online]. Springer, 2020, **6**(1) [cit. 2021-01-27]. Dostupné z:  
<https://link.springer.com/article/10.1186/s40759-020-00045-7>
- [16] ZUPERL, Uros a Franci CUS. Optimization of cutting conditions during cutting by using neural networks. *Robotics and computer-integrated manufacturing* [online]. Elsevier Ltd, 2003, **19**(1-2), 189-199 [cit. 2021-01-26]. ISSN 0736-5845. Dostupné z: doi:10.1016/S0736-5845(02)00079-0
- [17] SARAVANAN, R., R. SIVA SANKAR, P. ASOKAN, K. VIJAYAKUMAR a G. PRABHAHARAN. Optimization of cutting conditions during continuous finished profile machining using non-traditional techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, **26**(1), 30-40 [cit. 2021-01-26]. ISSN 0268-3768. Dostupné z:



- doi:10.1007/s00170-003-1938-x
- [18] WALVEKAR, A. a B. LAMBERT. AN APPLICATION OF GEOMETRIC PROGRAMMING TO MACHINING VARIABLE SELECTION. *International journal of production research* [online]. Taylor & Francis Group, 1970, **8**(3), 241-245 [cit. 2021-01-26]. ISSN 0020-7543. Dostupné z: doi:10.1080/00207547008929843
- [19] RAO, Rv a Vd KALYANKAR. Multi-pass turning process parameter optimization using teaching-learning-based optimization algorithm. *Scientia Iranica* [online]. ELSEVIER SCIENCE BV, 2013, **20**(3), 967-974 [cit. 2021-01-26]. ISSN 1026-3098. Dostupné z: doi:10.1016/j.scient.2013.01.002
- [20] ALRASHDAN, Abdalla, Omar BATAINEH a Mohammad SHBOOL. Multi-criteria end milling parameters optimization of AISI D2 steel using genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2014, **73**(5-8), 1201-1212 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-014-5921-5
- [21] JIA, Shun, Renzhong TANG, Jingxiang LV, Zhongwei ZHANG a Qinghe YUAN. Energy modeling for variable material removal rate machining process: an end face turning case. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. London: Springer London, 2016, **85**(9), 2805-2818 [cit. 2021-01-27]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-015-8133-8>
- [22] CAHA, Tomáš. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [23] KRUPKA, Ondřej. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
- [24] BARÁK, Vít. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie vrtání sdruženým nástrojem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [25] SONBERGER, Vít. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologii zalomeného hřídele*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [26] KOUKOL, Vladislav a Jan MÁDL. *Optimalizace obráběcího procesu: III. Mezinárodní konference* [online]. Plzeň, 2009 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16430/1/Koukol.pdf>
- [27] MÁDL, Jan. Optimalizace při obrábění (řezné parametry). *CA SYSTEMS AND TECHNOLOGIES* [online]. Žilina, 1997 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/013/013.htm>
- [28] CHLADIL, Jozef a Libor KOVÁR. Aplikace PC pro optimalizaci řezných podmínek. *CA SYSTEMS AND TECHNOLOGIES* [online]. Žilina, 1997 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <http://fstroj.utc.sk/journal/sk/015/015.htm>
- [29] WERNER, Tomáš. *Optimalizace* [online]. České vysoké učení technické: Fakulta elektrotechnická, 2011, s. 2-7 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: [https://cw.fel.cvut.cz/old/\\_media/courses/a4b33opt/cviceni/opt1.pdf](https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a4b33opt/cviceni/opt1.pdf)
- [30] MAREŠ, Tomáš. *Základy Konstrukční Optimalizace* [online]. Svazek II. Praha: České vysoké učení technické, 2006 [cit. 2021-02-01]. ISBN 80-239-6508-5.

- Dostupné z:  
<http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/z/z/ZakladyKonstrukcniOptimalizace/zko.pdf>
- [31] ZEMČÍK, Oskar. *Optimalizace ve strojírenské technologii: Prezentace*. VUT Brno.
- [32] BROŽOVÁ, Helena. *Matematické programování I: nelineární optimalizační modely*. První. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2004. ISBN 80-213-1141-X.
- [33] VENKRBEC, Václav. *OPTIMALIZAČNÍ METODY: PŘEDNÁŠKA 03* [Online]. Vysoké učení technické Brno: Fakulta stavební. Dostupné také z:  
[https://www.fce.vutbr.cz/TST/venkrbec.v/logistika/prednasky/CW057\\_03.pdf](https://www.fce.vutbr.cz/TST/venkrbec.v/logistika/prednasky/CW057_03.pdf)
- [34] ŠMARDA, Bohumil. *Lineární programování*. První. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1983.
- [35] ZAHRADNÍK, Josef. *Lineární programování při řízení hospodářství*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969.
- [36] LUŇÁČEK, Jiří a Tomáš HERALECKÝ. *Optimalizace podnikových aktivit*. První. Ostrava: Key Publishing, 2009. ISBN 978-80-7418-043-9.
- [37] ZÍSKAL, Jan a Jaroslav ŠVASTA. *Lineární programování V: lineární optimalizační modely*. První. Praha: Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta, 2006. ISBN 80-213-1412-5.
- [38] ROHN, Jiří. *Lineární algebra a optimalizace*. 1. vyd. Praha: Karolinum, 2004, 199 s. ISBN 80-246-0932-0.
- [39] Simplexová metoda. *Algoritmy* [online]. [cit. 2021-02-08]. Dostupné z:  
<https://www.algoritmy.net/article/1416/Simplexova-metoda>
- [40] ULRYCHOVÁ, Barbora. *Simplexová metoda řešení jednoduchých optimalizačních úloh*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta pedagogická, 2015.
- [41] RADA, Václav. *Teorie rozhodovacích procesů* [Online]. Ústav technologie, mechanizace a řízení staveb: Fakulta stavební VUT v Brně, 2014 [cit. 9.02.2021]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/3000526/>
- [42] KOPINCOVÁ, Edita. *Optimalizace - úvod do studia: Optimalizační metody pro studenty VŠMIE - Praha*. První. Praha: Vysoká škola manažerské informatiky a ekonomiky, 2007. ISBN 978-80-86847-21-4.
- [43] HLINĚNÝ, Petr. *Simplexová metoda: Principy* [Online]. Fakulta informatiky: Masarykova univerzita [cit. 12.02.2021]. Dostupné z:  
<https://is.muni.cz/el/1433/podzim2005/IA102/um/852133/OU-lect--6.pdf>
- [44] HOLÁ, Lucie. *Matematický model rozpočtu*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008.
- [45] PLEVNÝ, Miroslav. *Modelování a optimalizace v manažerském rozhodování*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-933-3.
- [46] PÁNKOVÁ, Václava. *Nelineární optimalizace pro ekonomy*. První. Praha: Professional Publishing, 2003. ISBN 80-86419-50-9.
- [47] DUPAČOVÁ, Jitka. *Úvod do optimalizace*. První. Praha: Matfyzpress, 2011. ISBN 978-80-7378-176-7.
- [48] LAGOVÁ, Milada a Josef JABLONSKÝ. *Lineární modely*. Druhé. Praha: Oeconomica, 2009. ISBN 978-80-245-1511-3.
- [49] HLADÍK, Milan. *Celočíselné Programování: text k přednášce část I teorie a modely*

- [online]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, 2017 [cit. 13.02.2021]. Dostupné z: [https://kam.mff.cuni.cz/~hladik/CP/text\\_cp.pdf](https://kam.mff.cuni.cz/~hladik/CP/text_cp.pdf)
- [50] MAŇAS, Miroslav. *Optimalizační metody*. První. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979.
- [51] SOUKOPOVÁ, Jana. *Vícekriteriální metody hodnocení* [online]. [cit. 13.02.2021]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/econ/jaro2012/MPV\\_TMHV/um/33148301/Studijni\\_text\\_metody\\_vicekriterialniho\\_rozhodovani.pdf](https://is.muni.cz/el/econ/jaro2012/MPV_TMHV/um/33148301/Studijni_text_metody_vicekriterialniho_rozhodovani.pdf)
- [52] MÁDL, Jan. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. Čtvrté. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1990. ISBN 80-01-00323-X.
- [53] HUMÁR, A. *Technologie obrábění – 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2003 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/studijni-opory/TI_TO-1cast.pdf)
- [54] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1998. ISBN 80-01-001864-6.
- [55] TUNGALOY, Member IMC Group. *Katalog nástrojů*. Brno, 2017.
- [56] MACUROVÁ, Pavla. *Řízení jakosti B*. První. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Ekonomická fakulta, 2008. ISBN 978-80-248-1720-0.
- [57] VÁCHAL, Jan a Marek VOCHOZKA. *Podnikové řízení*. První. Praha: Grada publishing a.s., 2013. ISBN 978-80-247-4642-5.
- [58] BRADÍK, Josef a Radovan NOVOTNÝ. *Řízení a zabezpečování jakosti*. První. Brno: Zdeněk Novotný, 2003. ISBN 80-214-2460-5.
- [59] ŠKOP, Michal a Petr POŠÍK. *Six Sigma: skripta ke kurzu*. První. Praha: StatSoft, 2008. ISBN 80-903630-2-4.
- [60] GEORGE, Michael L. *Kapesní příručka Lean Six Sigma: rychlý průvodce téměř 100 nástroji na zlepšování kvality procesů, rychlosti a komplexity*. První. Brno: SC&C Partner, 2010. ISBN 978-80-904099-2-7.
- [61] GEORGE, Michael, Dave ROWLANDS a Bill KASTLE. *Co je Lean Six Sigma?*. První. Brno: SC&C Partner, 2005. ISBN 80-239-5172-6.
- [62] KUMAR, Kamal. *Six Sigma DMAIC Series in R – Part 1* [online]. 2018 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://datascienceplus.com/six-sigma-dmaic-series-in-r-part-1/>
- [63] ZAPLETALÍK, Jiří. *Optimalizace měření a metod měření vybrané součásti*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [64] HŮLOVÁ, Marie a Eva JAROŠOVÁ. *Statistické metody v managementu kvality, environmentu a bezpečnosti*. 3. vydání. Praha: Oeconomica, 2004. ISBN 80-245-0691-2.
- [65] MICHÁLEK, Jiří. *Statistická regulace procesů (SPC): příručka*. 2. vydání. Praha: Česká společnost pro jakost, 2006. ISBN 80-02-01810-9.
- [66] KROPÁČ, Jiří. *Statistika C: statistická regulace, indexy způsobilosti, řízení zásob, statistické přejímky*. 2. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2008. ISBN 978-80-214-3591-9.
- [67] VYLEŤAL, Pavel st. *Ekonomické nástroje a metody řízení jakosti v akvizičním*

- procesu*. Praha: Ministerstvo obrany České republiky - Agentura vojenských informací a služeb, 2008. ISBN 978-80-7278-438-7.
- [68] DOLEŽAL, Jan, Pavel MÁCHAL a Branislav LACKO. *Projektový management podle IPMA*. První. Praha: Grada publishing a.s., 2009. ISBN 978-80-247-2848-3.
- [69] NENADÁL, Jaroslav. *Moderní management jakosti: principy, postupy, metody*. První. Praha: Management Press, 2008. ISBN 978-80-7261-186-7.
- [70] IMAI, Masaaki. *Kaizen: metoda, jak zavést úspěšnější a flexibilnější výrobu v podniku*. Brno: Computer Press a.s., 2004. ISBN 80-251-0461-3.
- [71] KOŠTURIK, Ján. *Kaizen: osvědčená praxe českých a slovenských podniků*. První. Brno: Computer Press a.s., 2010. ISBN 978-80-251-2349-2.
- [72] MUKHERJEE, Indrajit a Pradip RAY. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers & industrial engineering* [online]. Elsevier Ltd, 2006, **50**(1), 15-34 [cit. 2021-04-10]. ISSN 0360-8352. Dostupné z: doi:10.1016/j.cie.2005.10.001
- [73] NOVOHRADSKÝ, Jan. *Porovnání vybraných statistických metod pro hodnocení jakosti* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: [https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?pc\\_pagenavigationalstate=AAAAAQAGNjAyNTA2EwEAAAABA AhzdGF0ZUtleQAAAEAFc05MjIzMzcyMDM2ODU0Nzc1NTQyAAAAAA\\*\\*#prohlizeniSearchResult](https://portal.zcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html?pc_pagenavigationalstate=AAAAAQAGNjAyNTA2EwEAAAABA AhzdGF0ZUtleQAAAEAFc05MjIzMzcyMDM2ODU0Nzc1NTQyAAAAAA**#prohlizeniSearchResult)
- [74] *Taguchiho metody: Řízení jakosti* [online]. Technická univerzita v Liberci: Ekonomická fakulta, 2012 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: file:///C:/Users/%C5%A0t%C4%9Bpa/Downloads/Taguchiho\_metody%20(1).pdf
- [75] MATEZEX. *Nerezová ocel: Přehled nerez ocelí, vlastností a použití* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z: <https://www.matezex.cz/prevodni-tabulky.html>
- [76] ACERINOX. <https://www.acerinox.com/> [online]. [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.acerinox.com/opencms901/export/sites/acerinox/.content/galerias/galeria-a-descargas/galeria-documentos-producto/ACX525-low.pdf>
- [77] AK 1324. *AK 1324* [online]. [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.ak1324.cz/jakost-1-4307/>
- [78] Armat. *Armat made of stainless* [online]. [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>
- [79] Cedinox. <https://cadinox.com/en/> [online]. [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: [https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties\\_CZ.pdf](https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf)
- [80] ACERINOX. <https://www.acerinox.com/> [online]. [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.acerinox.com/opencms901/export/sites/acerinox/.content/galerias/galeria-a-descargas/galeria-documentos-producto/ACX150-low.pdf>
- [81] LH Technik [online]. [cit. 2021-01-04]. Dostupné z: <http://www.lh-technik.com/ultrapulsni-svarovani-up-schweissen.html>
- [82] KUBÍČEK, Jaroslav. *TECHNOLOGIE II ČÁST SVAŘOVÁNÍ: SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ* [online]. Díl 2. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ ÚST, TECHNICKÁ 2896/2, 616 69 BRNO, 2006 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z:

[http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_technologie\\_2\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf)

- [83] *JENOPTIK: MORE LIGHT* [online]. [cit. 2021-04-03]. Dostupné z:  
<https://www.jenoptik.cz/cz/produkty/opticke-mereni/opticline-cs155/300/600/>



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
<b>DMAIC</b>	<i>define</i> (definovat)– <i>measure</i> (měřit)– <i>analyze</i> (analyzovat)– <i>improve</i> (zlepšit)– <i>control</i> (řídit)
<b>LO</b>	lineární optimalizace
<b>LP</b>	lineární programování
<b>VBD</b>	vyměnitelná břitová destička
<b>konst</b>	konstanta

Symbol	Jednotka	Popis
<b>A</b>	[-]	matice konstant
<b>C</b>	[-]	pozitivně semidefinitní matice
<b>C<sub>Fe</sub></b>	[-]	materiálová konstanta
<b>C<sub>pl</sub></b>	[-]	dolní ukazatel způsobilosti
<b>C<sub>pu</sub></b>	[-]	horní ukazatel způsobilosti
<b>C<sub>p</sub></b>	[-]	ukazatel způsobilosti
<b>C<sub>pk</sub></b>	[-]	ukazatel způsobilosti
<b>E<sub>cq</sub></b>	[μm]	<i>form deviation of circle (RMS)</i>
<b>E<sub>2</sub></b>	[-]	Euklidovský prostor
<b>F<sub>c</sub></b>	[N]	řezná síla
<b>D</b>	[mm]	průměr obrobku
<b>D<sub>D</sub></b>	[-]	přijatelná odchylka od optimální hodnoty
<b>K</b>	[-]	<i>symmetry of cutting edge</i>
<b>KB<sub>max</sub></b>	[mm]	maximální opotřebení na čele
<b>L, L<sub>1</sub>, L<sub>2-6</sub>, L<sub>c</sub></b>	[mm]	jednotlivé délky hrubovaných úseků
<b>LSL</b>	[mm]	dolní mezní rozměr
<b>L<sub>r</sub></b>	[mm]	radiální vzdálenost
<b>M</b>	[-]	množina přípustných řešení
<b>N<sub>F</sub></b>	[Kč]	nástrojové náklady na frézu
<b>N<sub>n</sub></b>	[Kč]	nástrojové náklady
<b>N<sub>T4</sub></b>	[Kč]	nástrojové náklady na nástroj T4

<b>N<sub>ok</sub></b>	[Kč/ks]	náklady na jeden kus
<b>N<sub>ok1</sub></b>	[Kč/ks]	náklady na jeden kus při výrobě nástrojem T4
<b>N<sub>ok2</sub></b>	[Kč/ks]	náklady na jeden kus pro frézovací nástroj
<b>N<sub>su</sub></b>	[Kč]	náklady na strojní a vedlejší práci
<b>N<sub>vn</sub></b>	[Kč]	náklady na výměnu a znovu seřízení nástroje
<b>P<sub>c</sub></b>	[kW]	řezný výkon
<b>P<sub>vk</sub></b>	[ks/rok]	počet vyrobených kusů za rok
<b>R<sup>n</sup></b>	[-]	vektorový prostor
<b>R<sub>a</sub></b>	[μm]	průměrná aritmetická úchylka profilu
<b>R<sub>z</sub></b>	[μm]	největší výška profilu
<b>R<sub>1-6</sub>, R<sub>C1</sub>, R<sub>C8000</sub></b>	[-]	počet rázů pro nástroj T4
<b>R<sub>f1-3</sub>, R<sub>C1f</sub>, R<sub>Cf30000</sub></b>	[-]	počet rázů pro frézu
<b>S<sub>α</sub></b>	[μm]	<i>dist. apex to end of clearance roundness</i>
<b>S<sub>γ</sub></b>	[μm]	<i>dist. apex to end of rake roundness</i>
<b>T</b>	[min]	trvanlivost nástroje
<b>U<sub>K</sub></b>	[Kč/ks]	úspora na jeden obrobený kus
<b>U<sub>R</sub></b>	[Kč/rok]	celková roční úspora
<b>USL</b>	[mm]	horní mezní rozměr
<b>VB<sub>max</sub></b>	[mm]	maximální opotřebení na hřbetě
<b>VN<sub>u</sub></b>	[Kč]	výrobní náklady na daný operační úsek
<b>W<sub>Δr</sub></b>	[μm]	<i>edge width</i>
<b>Z</b>	[-]	množina celých čísel
<b>Z<sub>F</sub></b>	[ks]	životnost frézovacího nástroje
<b>Z<sub>n</sub></b>	[ks]	životnost nástroje
<b>Z<sub>T4</sub></b>	[ks]	životnost nástroje T4
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	šířka záběru ostří
<b>b</b>	[-]	vektor pravých stran omezujících podmínek
<b>b<sub>α</sub></b>	[μm]	<i>true supporting bevel length</i>
<b>c<sub>j</sub></b>	[mm]	j-tá konstanta lineární účelové funkce
<b>c<sub>v</sub></b>	[-]	konstanta
<b>c<sub>1</sub></b>	[-]	proměnná lineární účelové funkce

$c_2$	[-]	proměnná lineární účelové funkce
$f$	[mm]	posuv na otáčku
$f(x)$	[-]	obecná kritériální funkce proměnných $x_1, x_2, \dots, x_n$
$f_{smax}$	[mm]	max. přípustný posuv z hlediska stroje
$f_{smin}$	[mm]	min. přípustný posuv z hlediska stroje
$f_{umax}$	[mm]	max. přípustný posuv z hlediska utváření třísky
$f_{umin}$	[mm]	min. přípustný posuv z hlediska utváření třísky
$n$	[-]	počet proměnných v dané úloze
$n$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky nástroje a obrobku
$n_f$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky nástroje frézy
$n_o$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky obrobku při hrubování frézou
$n_{smax}$	$[\text{min}^{-1}]$	max. přípustné otáčky z hlediska výkonu motoru
$n_{smin}$	$[\text{min}^{-1}]$	min. přípustné otáčky z hlediska výkonu motoru
$n_1$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky obrobku při hrubování nástrojem T4
$n_2$	$[\text{min}^{-1}]$	otáčky nástroje T4
$m$	[-]	exponent
$q(x)$	[-]	reálná funkce, udávající omezující podmínky
$q_i(x)$	[-]	reálná funkce, udávající i-tou omezující podmínku
$q_j(x)$	[-]	reálná funkce, udávající j-tou omezující podmínku
$r_n$	$[\mu\text{m}]$	poloměr ostří
$t_{ASC}, t_{AS1-6}$	[s]	strojní časy
$t_{ASCf}, t_{ASf1-3}$	[s]	strojní časy
$t_{ASf30000}$	[min]	strojní čas pro životnost frézy
$t_{AS8000}$	[min]	strojní čas pro životnost nástroje T4
$t_u$	[min]	čas operačního úseku
$t_{vn}$	[min]	čas na výměnu a znovu seřízení nástroje
$v_c$	[mm/min]	řezná rychlost
$v_f, v_{f1-3}$	[mm/min]	posuvová rychlost
$x$	[-]	vektor proměnných $x_1, x_2, \dots, x_n$
$\bar{x}$	[-]	střední hodnota

$\mathbf{x}_{Fc}, \mathbf{x}_{vc}$	[-]	exponent vlivu $a_p$
$\mathbf{x}_i$	[-]	i-tá proměnná lineární účelové funkce
$\mathbf{x}_j$	[-]	j-tá proměnná lineární účelové funkce
$\mathbf{x}_{opt}$	[-]	optimální řešení
$\mathbf{x}_{sup}$	[-]	suboptimální řešení
$\mathbf{x}_1$	[-]	proměnná lineární účelové funkce
$\mathbf{x}_2$	[-]	proměnná lineární účelové funkce
$\mathbf{y}_{Fc}, \mathbf{y}_{vc}$	[-]	exponent vlivu $f$
$\mathbf{z}$	[-]	úsek který přímka vytíná na ose $y$
$\mathbf{z}_v$	[-]	počet výměn nástroje
$\Delta r$	[ $\mu\text{m}$ ]	<i>min. dist. of edge to apex</i>
$\alpha_o$	[°]	nástrojový ortogonální úhel hřbetu
$\beta_o$	[°]	nástrojový ortogonální úhel břitu
$\gamma_o$	[°]	nástrojový ortogonální úhel čela
$\sigma$	[mm]	směrodatná odchylka

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulky naměřených hodnot hřbetního a čelního opotřebení nástroje T4.

Příloha 2 Tabulka snímků opotřebeného břitu destičky a jeho geometrie pořízená na přístroji Alicona.

Příloha 3 Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu destičky ze SK.

Příloha 4 Protokol z měření ostří VBD ze SK.

Příloha 5 Tabulka snímků opotřebeného břitu frézy a jeho geometrie pořízená na přístroji Alicona.

Příloha 6 Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu frézy ze SK.

Příloha 7 Protokol z měření ostří frézy ze SK.

Příloha 8 Protokol pro výpočet parametrů způsobilosti.

Příloha 9 Protokoly z vyhodnocení kvality obrobeného povrchu z přístroje Alicona.



## PŘÍLOHA 1

Tabulka hodnot čelního a hřbetního opotřebení pro jednotlivé VBD.

Hodnoty čelního a hřbetního opotřebení pro jednotlivé VBD		
Označení VBD	Opotřebení na čele $KB_{\max}$ [mm]	Opotřebení na hřbetě $VB_{\max}$ [mm]
1	0,366	0,123
2	0,208	0,077
3	0,197	0,229
4	0,315	0,269
5	0,217	0,049
6	0,145	0,051
7	0,261	0,125
8	0,185	0,072
9	0,193	0,076

Tabulka hodnot čelního opotřebení  $KB_{\max}$  pro jednotlivé bříty frézy.

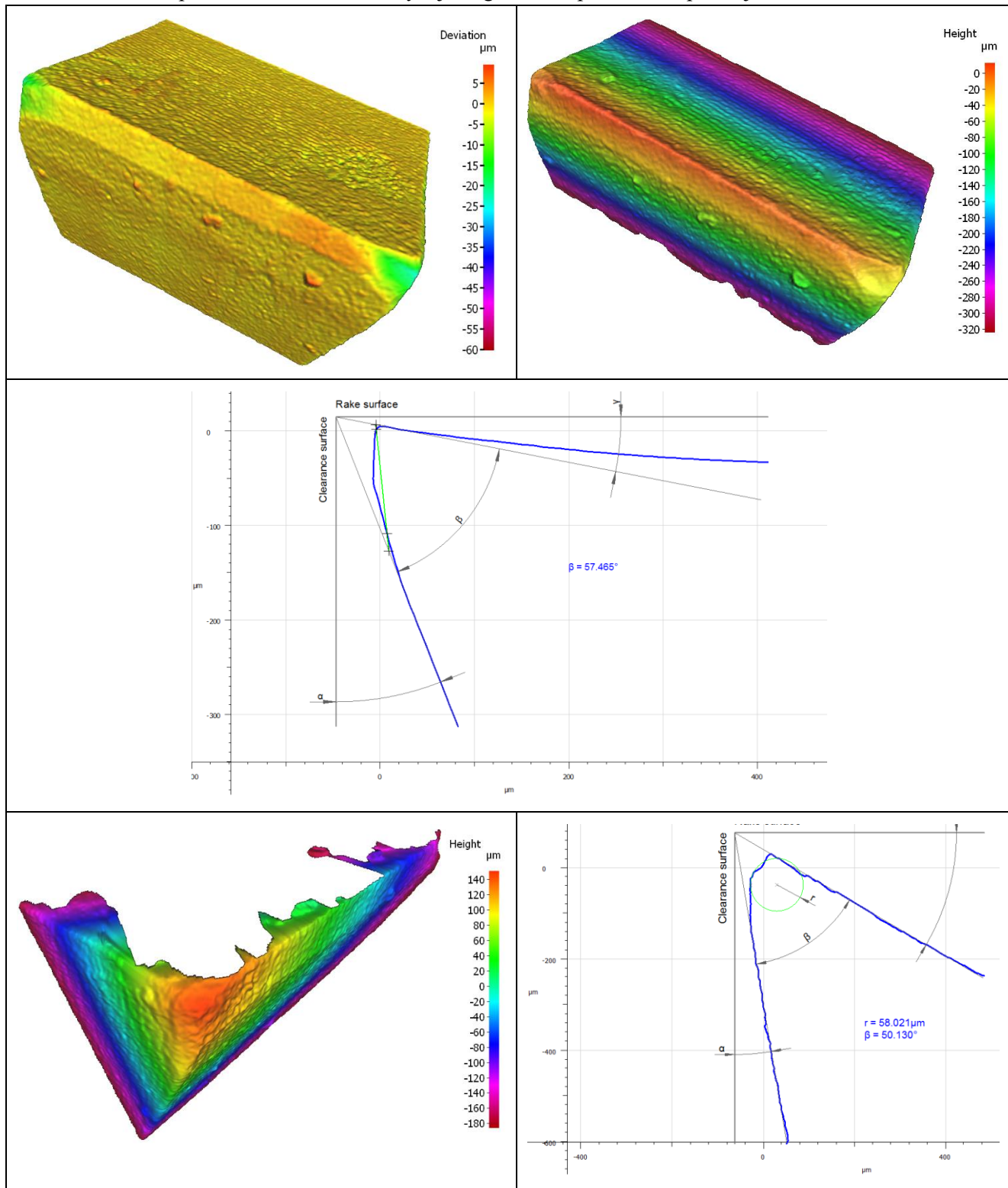
Hodnoty čelního opotřebení $KB_{\max}$				
Počet obrobených kusů	Břit frézy			
	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	B4 [mm]
0	0	0	0	0
5000	0,010	0,009	0,012	0,012
10000	0,015	0,013	0,016	0,017
15000	0,018	0,016	0,021	0,023
20000	0,023	0,021	0,025	0,027
25000	0,027	0,026	0,030	0,029
30000	0,033	0,031	0,035	0,036

Tabulka hodnot hřbetního opotřebení  $VB_{\max}$  pro jednotlivé bříty frézy.

Hodnoty hřbetního opotřebení $VB_{\max}$				
Počet obrobených kusů	Břit frézy			
	B1 [mm]	B2 [mm]	B3 [mm]	B4 [mm]
0	0	0	0	0
5000	0,029	0,025	0,031	0,028
10000	0,037	0,035	0,039	0,038
15000	0,048	0,044	0,050	0,047
20000	0,055	0,051	0,058	0,055
25000	0,058	0,057	0,063	0,065
30000	0,063	0,060	0,067	0,070

## PŘÍLOHA 2

Tabulka snímků opotřebeného bříty destičky a jeho geometrie pořizena na přístroji Alicona.



## PŘÍLOHA 3

Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu destičky ze SK.

Řez číslo	$r_n$ [μm]	$b\alpha$ [μm]	$\alpha_o$ [°]	$B_o$ [°]	$\gamma_o$ [°]	$S\alpha$ [μm]	$S\gamma$ [μm]	$K$ [-]	$\Delta r$ [μm]	$W\Delta r$ [μm]	$Ecq$ [μm]
1	9.066	204.996	32.140	60.976	-3.116	11.736	15.015	1.279	8.158	10.100	0.195
2	9.290	206.487	32.362	60.741	-3.104	12.127	15.124	1.247	8.380	10.359	0.201
3	9.402	-	25.960	67.132	-3.093	12.226	15.561	1.273	8.467	10.478	0.221
4	9.315	-	26.093	66.984	-3.076	12.257	15.753	1.285	8.310	10.347	0.223
5	9.286	-	26.183	71.772	-7.955	11.384	12.024	1.056	8.248	10.299	0.226
6	9.276	182.655	32.323	65.620	-7.943	11.369	12.028	1.058	8.217	10.279	0.239
7	9.243	-	26.138	66.947	-3.085	12.066	16.583	1.374	8.155	10.228	0.254
8	9.131	199.533	31.749	61.326	-3.076	11.855	16.715	1.410	7.929	10.048	0.231
9	9.469	199.951	31.774	61.305	-3.079	12.066	16.128	1.337	8.374	10.486	0.180
10	9.821	200.362	31.791	61.298	-3.089	12.253	15.286	1.248	8.765	10.910	0.138
11	9.792	200.399	31.814	61.304	-3.118	12.218	15.059	1.233	8.701	10.862	0.151
12	9.758	203.898	32.002	61.140	-3.142	12.412	14.934	1.203	8.709	10.841	0.150
13	9.717	206.466	32.173	61.056	-3.230	12.202	14.868	1.218	8.735	10.822	0.146
14	9.558	201.972	31.812	61.434	-3.246	11.732	14.746	1.257	8.629	10.661	0.139
15	9.557	201.286	31.736	61.523	-3.260	11.597	14.862	1.282	8.695	10.688	0.149
16	8.500	201.115	31.693	61.577	-3.270	11.497	14.477	1.259	7.508	9.409	0.167
17	9.214	199.825	31.656	61.618	-3.274	11.414	14.123	1.237	8.403	10.313	0.123
18	9.065	198.380	31.608	61.665	-3.273	11.533	14.030	1.217	8.263	10.144	0.130
19	8.538	196.279	31.521	61.771	-3.292	11.699	14.036	1.200	7.655	9.501	0.165
20	8.574	194.818	31.551	61.883	-3.434	11.657	14.072	1.207	7.688	9.540	0.172
21	8.603	194.312	31.614	61.908	-3.522	11.703	14.248	1.217	7.688	9.561	0.184
22	8.598	193.699	31.613	61.781	-3.394	11.640	14.396	1.237	7.680	9.555	0.180
23	8.673	191.831	31.528	61.964	-3.492	11.460	14.138	1.234	7.812	9.666	0.175
24	8.586	189.822	31.338	62.186	-3.523	11.360	13.907	1.224	7.715	9.561	0.166
25	8.624	188.694	31.271	62.229	-3.500	11.507	13.965	1.214	7.745	9.602	0.170
26	8.637	189.208	31.488	61.865	-3.354	11.692	13.777	1.178	7.740	9.609	0.146
27	9.033	187.566	31.589	61.803	-3.392	11.563	13.747	1.189	8.206	10.097	0.117
28	9.081	188.158	31.687	61.862	-3.549	11.558	13.750	1.190	8.271	10.160	0.118
29	9.086	186.354	31.540	62.165	-3.705	11.372	13.708	1.205	8.296	10.173	0.122
30	8.704	187.058	31.573	62.461	-4.034	11.043	13.162	1.192	7.906	9.729	0.112
31	9.154	191.550	31.692	61.974	-3.666	11.083	13.319	1.202	8.495	10.307	0.094
32	8.738	-	26.089	66.959	-3.048	11.089	13.661	1.232	8.021	9.802	0.101
33	8.758	-	26.113	67.218	-3.331	11.021	13.391	1.215	8.053	9.830	0.091
34	8.972	-	26.116	67.514	-3.630	11.264	13.234	1.175	8.289	10.086	0.087
35	8.826	-	26.094	67.175	-3.269	11.478	13.411	1.168	8.094	9.897	0.100
36	8.412	192.247	31.643	61.599	-3.242	11.390	13.714	1.204	7.573	9.373	0.131
37	8.603	192.200	31.820	61.864	-3.684	11.252	13.700	1.218	7.782	9.602	0.144
38	8.800	194.919	31.821	61.568	-3.389	11.684	14.179	1.214	7.947	9.816	0.149
39	9.220	197.412	31.825	61.396	-3.222	11.989	14.367	1.198	8.451	10.338	0.155
40	9.296	198.376	31.884	61.340	-3.224	12.252	14.211	1.160	8.556	10.437	0.148

## PŘÍLOHA 4

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

### EdgeMasterModule Measurement Report

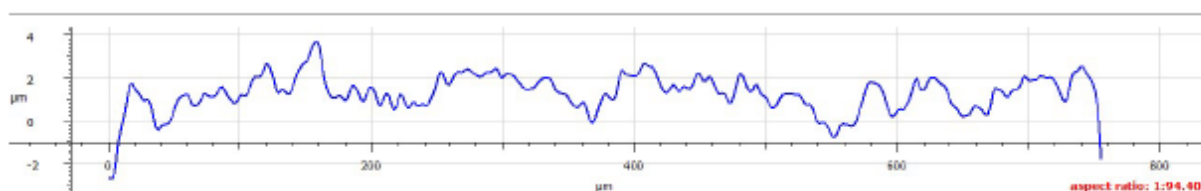
Date of Measurement: 09.03.2021 19:09:36

Operator:

Administrator

Edge Profile Type: Supporting Bevel

Reference Type: Edge Quality 10x

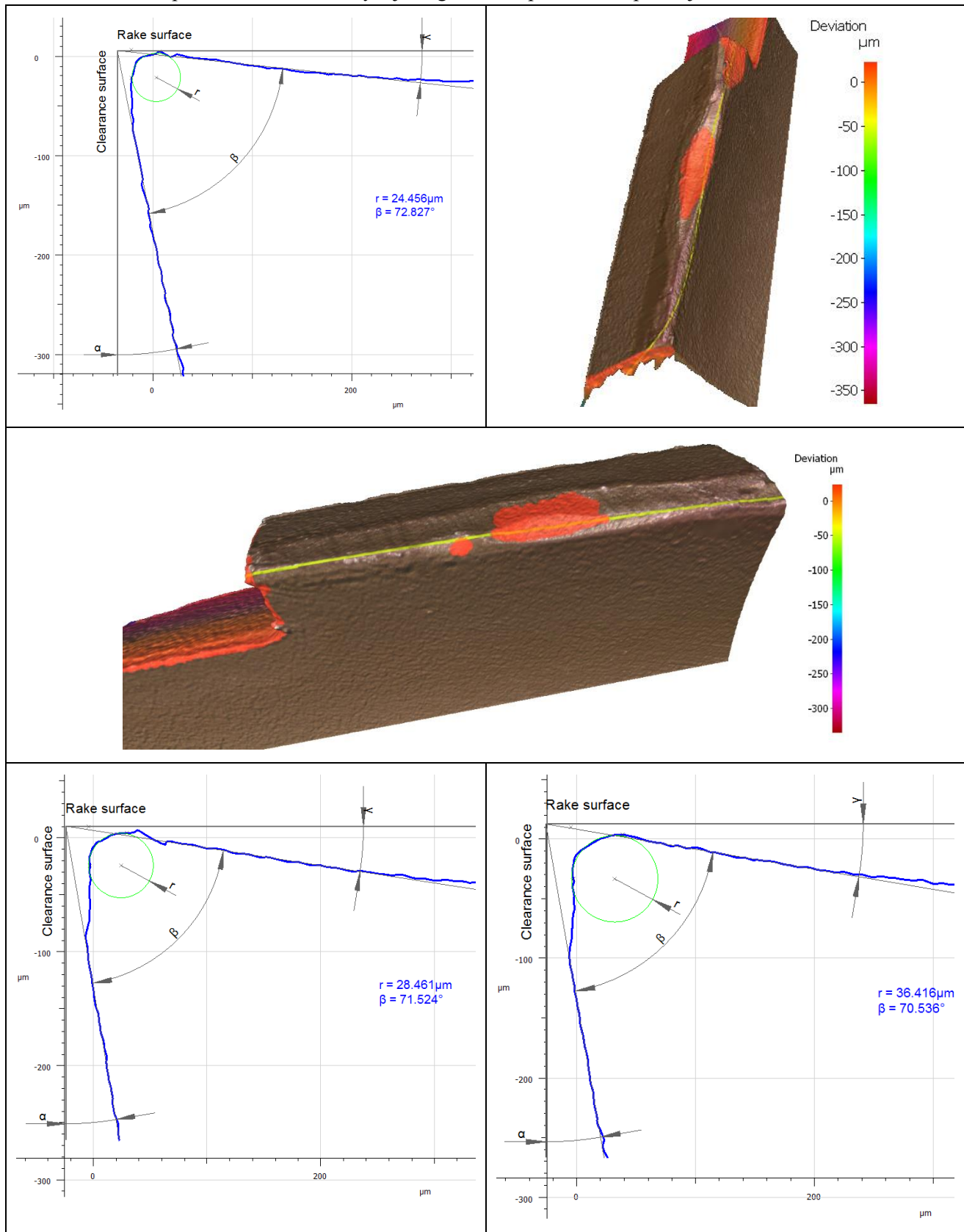


Name	Value	Unit	Description
Nd	0.000		Number of defects
L	757.473	µm	Evaluated length
Pd	0.000	%	Percentage of edge length that has defects
Vdrel	-	µm <sup>2</sup>	Relative defect volume per length
Ddmax	-	µm	Max defect depth along profile
Ddmean	-	µm	Mean defect depth along profile
Vdmax	-	µm <sup>3</sup>	Max defect volume
Vdmean	-	µm <sup>3</sup>	Mean defect volume
Ldmax	-	µm	Max defect length along profile
Ldmean	-	µm	Mean defect length along profile
Ldcmax	-	µm	Max defect length along clearance surface
Ldcmean	-	µm	Mean defect length along clearance surface
Ldrmax	-	µm	Max defect length along rake surface
Ldrmean	-	µm	Mean defect length along rake surface
Lc	250.000	µm	LambdaC: cut off wavelength
Ra	0.520	µm	Average roughness of profile
Rq	0.636	µm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rz	2.313	µm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rp	2.076	µm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	1.638	µm	Maximum valley depth of roughness profile

Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 09.03.2021 19:09:36

## PŘÍLOHA 5

Tabulka snímků opotřebeného břitu frézy a jeho geometrie pořízená na přístroji Alicona.



## PŘÍLOHA 6

Tabulka naměřených hodnot při měření geometrie břitu frézy ze SK.

Řez číslo	$r_n$ [μm]	$\alpha_o$ [°]	$\beta_o$ [°]	$\gamma_o$ [°]	$S\alpha$ [μm]	$S\gamma$ [μm]	K [-]	$\Delta r$ [μm]	$W\Delta r$ [μm]	$E_{cq}$ [μm]
1	3.100	-2.535	69.371	23.164	6.752	4.633	0.686	2.490	3.319	0.141
2	3.784	-3.875	70.105	23.770	6.908	4.480	0.648	2.943	4.004	0.163
3	3.780	-4.559	69.978	24.582	7.307	3.691	0.505	2.785	3.923	0.094
4	3.368	-5.083	71.042	24.041	9.287	4.546	0.489	2.498	3.503	0.201
5	4.439	-5.325	71.283	24.042	10.755	5.624	0.523	3.347	4.645	0.139
6	3.526	-5.450	71.273	24.177	8.091	4.901	0.606	2.597	3.659	0.118
7	3.158	-5.804	71.673	24.131	6.893	4.108	0.596	2.350	3.289	0.113
8	4.382	-5.785	70.440	25.345	8.864	4.849	0.547	3.285	4.576	0.167
9	3.564	-6.110	70.774	25.336	7.562	4.400	0.582	2.558	3.663	0.177
10	3.612	-5.860	70.807	25.053	6.610	4.475	0.677	2.682	3.759	0.110
11	4.327	-5.666	70.974	24.693	10.395	5.137	0.494	3.111	4.450	0.144
12	3.666	-5.941	70.787	25.154	6.468	4.476	0.692	2.637	3.771	0.091
13	3.713	-5.952	70.264	25.688	5.477	5.350	0.977	2.683	3.826	0.036
14	3.416	-5.811	70.823	24.989	7.767	5.023	0.647	2.477	3.524	0.084
15	4.455	-5.901	71.030	24.871	6.119	5.681	0.928	3.093	4.523	0.071
16	4.288	-5.694	71.275	24.419	7.785	4.359	0.560	3.098	4.418	0.123
17	3.981	-5.687	71.304	24.383	6.460	4.417	0.684	2.874	4.100	0.074
18	3.686	-5.961	69.991	25.970	6.815	4.708	0.691	2.661	3.797	0.096
19	3.143	-5.579	69.998	25.581	5.218	4.660	0.893	2.088	3.139	0.083
20	3.141	-5.799	68.340	27.458	13.973	4.745	0.340	2.225	3.213	0.136
21	5.504	-5.760	70.744	25.016	6.893	13.325	1.933	3.949	5.656	0.159
22	5.386	-5.781	71.037	24.744	15.659	6.247	0.399	4.102	5.657	0.137
23	4.221	-5.746	70.985	24.761	7.837	6.402	0.817	3.069	4.359	0.106
24	2.828	-5.854	68.820	27.034	8.367	3.181	0.380	2.041	2.912	0.162
25	3.830	-5.944	67.461	28.483	6.567	3.933	0.599	2.719	3.920	0.099
26	3.598	-5.772	70.157	25.615	7.574	4.023	0.531	2.643	3.730	0.149
27	2.790	-5.903	67.420	28.483	7.275	3.216	0.442	2.016	2.874	0.084
28	3.243	-6.096	70.924	25.172	5.627	4.624	0.822	2.266	3.300	0.075
29	3.676	-5.860	70.570	25.290	7.366	3.585	0.487	2.627	3.772	0.118
30	2.879	-5.960	70.285	25.676	6.771	3.961	0.585	2.088	2.970	0.117
31	5.200	-5.748	71.066	24.682	21.690	4.979	0.230	3.773	5.365	0.149
32	5.493	-5.849	69.156	26.693	8.666	5.064	0.584	4.101	5.727	0.152
33	2.837	-5.738	66.841	28.897	8.454	2.740	0.324	1.999	2.896	0.128



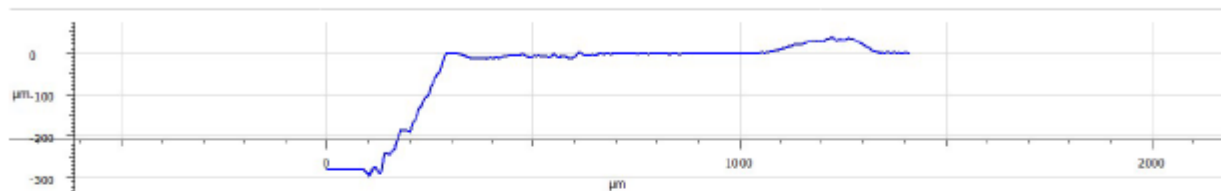
## PŘÍLOHA 7

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

**alicon**a

# EdgeMasterModule Measurement Report

Date of Measurement: 17.03.2021 10:04:52 Operator: Administrator  
Edge Profile Type: No Bevel  
Reference Type: Edge Quality 10x



Name	Value	Unit	Description
Nd	2.000		Number of defects
L	1412.193	µm	Evaluated length
Pd	83.699	%	Percentage of edge length that has defects
Vdrel	7484.178	µm <sup>2</sup>	Relative defect volume per length
Ddmax	-296.686	µm	Max defect depth along profile
Ddmean	-82.151	µm	Mean defect depth along profile
Vdmax	10568126.118	µm <sup>3</sup>	Max defect volume
Vdmean	5284550.270	µm <sup>3</sup>	Mean defect volume
Ldmax	1181.994	µm	Max defect length along profile
Ldmean	610.374	µm	Mean defect length along profile
Ldcmax	426.066	µm	Max defect length along clearance surface
Ldcmean	427.762	µm	Mean defect length along clearance surface
Ldrmax	307.698	µm	Max defect length along rake surface
Ldrmean	211.746	µm	Mean defect length along rake surface
Lc	250.000	µm	LambdaC: cut off wavelength
Ra	3.829	µm	Average roughness of profile
Rq	7.754	µm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rz	21.459	µm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rp	41.628	µm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	23.141	µm	Maximum valley depth of roughness profile

Measurement performed by Alicona EdgeMasterModule, 17.03.2021 10:04:52

## PŘÍLOHA 8

Měřicí protokol 25 dílů									
Název dílu:					Cílová hodnota způsobilosti: 1,67				
Archiv. Č. / Položka:					Zákaznické č.:				
Zakázka:					Č. stroje:				
-Měření-									
č. pozice	úsek 6								
jednotka	mm								
jmenovitá h.	5,75								
tolerance +	0,05								
tolerance -	0,05								
HMR	5,8	0	0	0	0	0	0	0	0
DMR	5,7	0	0	0	0	0	0	0	0
Díl 1	5,748								
Díl 2	5,766								
Díl 3	5,746								
Díl 4	5,746								
Díl 5	5,751								
Díl 6	5,762								
Díl 7	5,754								
Díl 8	5,763								
Díl 9	5,752								
Díl 10	5,765								
Díl 11	5,747								
Díl 12	5,764								
Díl 13	5,751								
Díl 14	5,768								
Díl 15	5,760								
Díl 16	5,766								
Díl 17	5,751								
Díl 18	5,758								
Díl 19	5,741								
Díl 20	5,762								
Díl 21	5,755								
Díl 22	5,744								
Díl 23	5,748								
Díl 24	5,759								
Díl 25	5,742								

Statistika									
Střední hodnota	5,75474								
Směr. Odchylka	0,00835								
Max	5,768								
Min	5,741								
C <sub>pU</sub>	1,80794								
C <sub>pL</sub>	2,1863								
C <sub>p</sub>	1,997								
C <sub>pk</sub>	1,808								
Výsledek	Způsobilý								

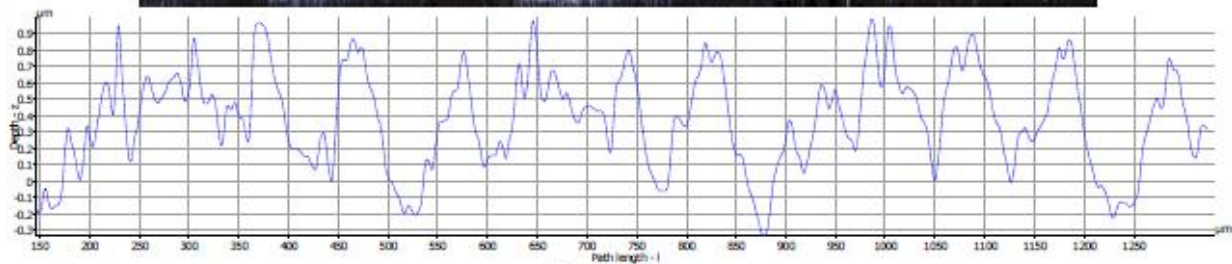
## PŘÍLOHA 9

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

alicon

# Measurement Report Profile Measurement

Povrch1



Ra: 0.410µm  
Rq: 0.480µm  
Rz: 1.145µm

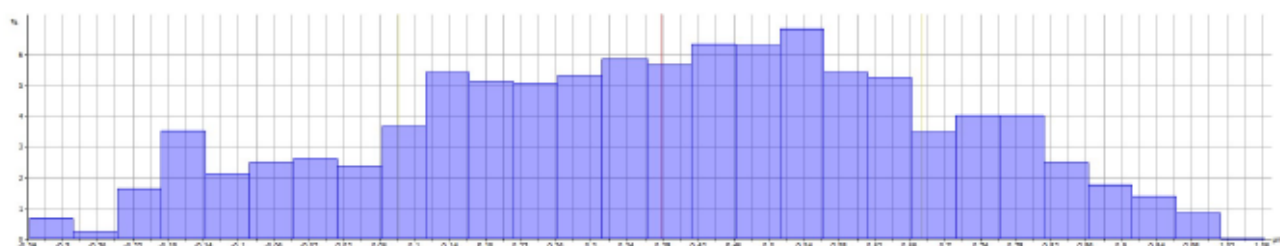
Filter: high pass - roughness profile  
Lc:= 250.000µm

# Measurement Report

## Profile Roughness Measurement

### Parameters of Roughness Profile

Povrch1



### Histogram Histogram Settings

Number of Classes: 28  
Minimum Value: -0.338µm  
Maximum Value: 1.062µm  
Class Width: 0.050µm

### Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	1640		Number of data values
Classes	28		Number of histogram classes
Mean Value	0.378	µm	Mean value of data values
Standard Deviation	0.296	µm	Mean Value of standard deviation

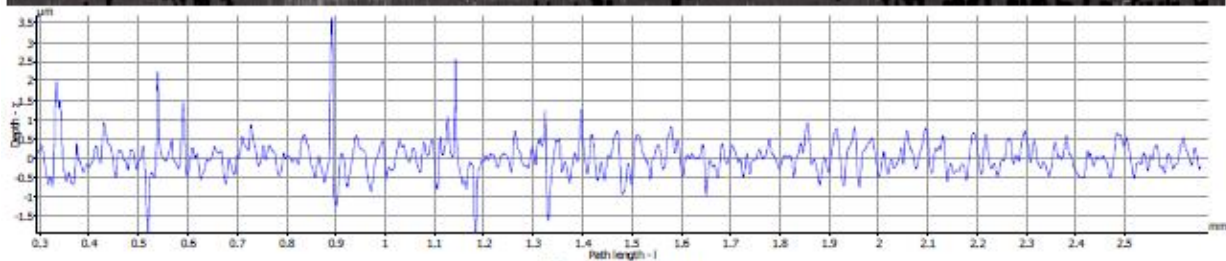
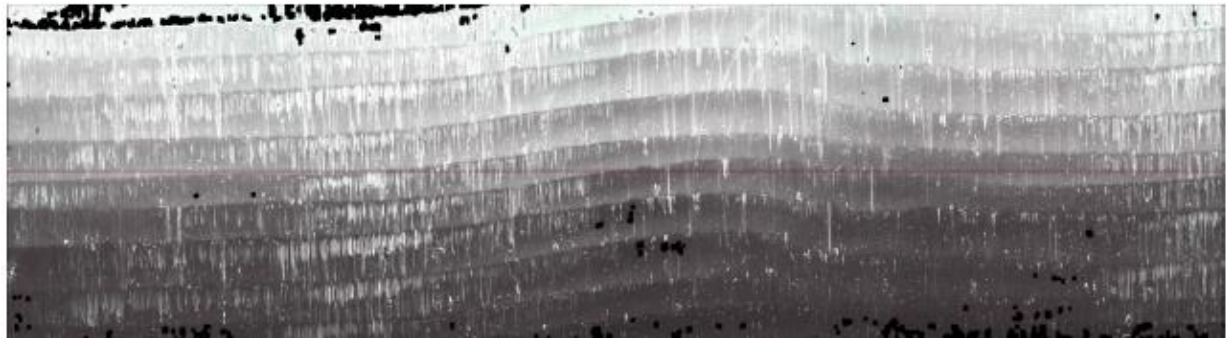
### Parameters

Name	Value	Unit	Description
Ra	0.410	µm	Average roughness of profile
Rq	0.480	µm	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	1.330	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	1.145	µm	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	1.330	µm	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	0.993	µm	Maximum peak height of roughness profile
Rv	0.338	µm	Maximum valley height of roughness profile
Rc	1.238	µm	Mean height of profile irregularities of roughness profile

# Measurement Report

## Profile Measurement

Povrch2



Ra:  $0.311\mu\text{m}$   
Rq:  $0.443\mu\text{m}$   
Rz:  $3.120\mu\text{m}$

Filter: high pass - roughness profile  
Lc:=  $250.000\mu\text{m}$

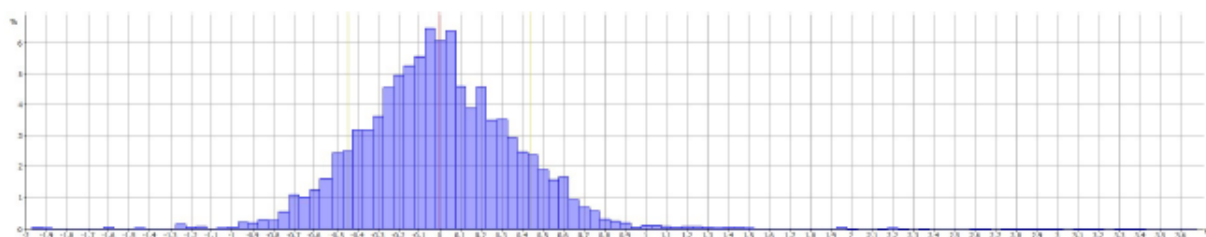


# Measurement Report

## Profile Roughness Measurement

### Parameters of Roughness Profile

Povrch2



### Histogram Histogram Settings

Number of Classes: 113  
Minimum Value: -1.974 $\mu\text{m}$   
Maximum Value: 3.676 $\mu\text{m}$   
Class Width: 0.050 $\mu\text{m}$

### Statistics

Name	Value	Unit	Description
Elements	6554		Number of data values
Classes	113		Number of histogram classes
Mean Value	-0.001	$\mu\text{m}$	Mean value of data values
Standard Deviation	0.443	$\mu\text{m}$	Mean Value of standard deviation

### Parameters

Name	Value	Unit	Description
Ra	0.311	$\mu\text{m}$	Average roughness of profile
Rq	0.443	$\mu\text{m}$	Root-Mean-Square roughness of profile
Rt	5.632	$\mu\text{m}$	Maximum peak to valley height of roughness profile
Rz	3.120	$\mu\text{m}$	Mean peak to valley height of roughness profile
Rmax	5.632	$\mu\text{m}$	Maximum peak to valley height of roughness profile within a sampling length
Rp	3.658	$\mu\text{m}$	Maximum peak height of roughness profile
Rv	1.974	$\mu\text{m}$	Maximum valley height of roughness profile
Rc	2.118	$\mu\text{m}$	Mean height of profile irregularities of roughness profile